

**MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO UNS  
A906061, DEL BRONCE UNS C90700 Y DEL LATÓN UNS C38500**



**JAIME LUIS CÚJAR VERTEL  
JAVIER ADOLFO DE ORO COGOLLO**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2016**

**MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO UNS  
A906061, DEL BRONCE UNS C90700 Y DEL LATÓN UNS C38500**

**JAIME LUIS CÚJAR VERTEL  
JAVIER ADOLFO DE ORO COGOLLO**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Trabajo de investigación como  
parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

**Director (s):  
LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN, Ph.D**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2016**

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del  
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

**Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN .....	17
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
1.1. ALEACIONES NO FERROSAS.....	19
1.1.1. Tratamientos termicos en aleaciones no ferrosas.....	20
1.1.2. Aluminio y aleaciones de aluminio.....	28
1.1.3. Cobre y aleaciones de cobre.....	40
1.2. ENSAYO DE TENSIÓN .....	59
2. MATERIALES Y METODOS .....	65
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	65
3.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL .....	68
3.1.1. Composición química .....	70
3.1.2. Microestructura.....	71

3.2. ENSAYOS DE TENSIÓN.....	81
3.2.1. Aluminio UNS A906061.....	81
3.2.2. Bronce UNS C90700.....	84
3.2.3. Latón UNS C38500.....	87
4. CONCLUSIONES .....	93
5. RECOMENDACIONES .....	95
6. BIBLIOGRAFÍA. ....	96
ANEXOS .....	100

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de las aleaciones no ferrosas con base en la densidad. Adaptada de Moore, H. y Kibbey, D. (1987) .....	20
<b>Tabla 2.</b> Producción mundial del aluminio Enero 2016 - marzo 2016. Cifras en miles de toneladas métricas de aluminio. Adaptada de World Aluminium (2016).....	21
<b>Tabla 3.</b> Propiedades del aluminio puro. Adaptado de Askeland, D. (1998).....	32
<b>Tabla 4.</b> Propiedades mecánicas del aluminio puro. Adaptado de Askeland, D.(1998). 33	
<b>Tabla 5.</b> Composición química UNS A 906061. Adaptado de Cohen, A. (1992). ....	37
<b>Tabla 6.</b> Propiedades físicas aluminio UNS A 906061. Adaptado de Tecniaceros. Aluminio. (2013).....	37
<b>Tabla 7.</b> Propiedades mecánicas Aleación de aluminio UNS A 906061. Adaptado de Cohen, A. (1992).....	38
<b>Tabla 8.</b> Eutécticos del sistema Al-Mg-Si. Adaptado de Echavarria, A. y Orrego, G. (2012). ....	39
<b>Tabla 9.</b> Solubilidad del $Mg_2Si$ en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz. Adaptado de Echavarria, A. y Orrego, G. (2012) .....	40
<b>Tabla 10.</b> Características principales del cobre puro, en estado duro y recocido. Adaptado de Rodríguez, J et al., (2006).....	43
<b>Tabla 11.</b> Composición de cobres débilmente aleados y sus aplicaciones. Adaptado de Garcés, Henríquez & Tapia (2003). ....	45
<b>Tabla 12.</b> Composición de aleaciones con alto contenido de cobre y sus aplicaciones. Adaptado de Garcés, Henríquez & Tapia (2003).....	45

<b>Tabla 13.</b> Aplicaciones de los cuproaluminios de acuerdo a sus características. Adaptado de Garcés, Henríquez & Tapia (2003).....	49
<b>Tabla 14.</b> Composición química del bronce UNS C90700 o SAE65. Adaptado de Industrial Okendo. (2012). ....	51
<b>Tabla 15.</b> Propiedades mecánicas del bronce UNS C90700 o SAE65. Adaptado de Cohen, A. (1992).....	51
<b>Tabla 16.</b> Composición química Latón UNS C38500. Adaptado de Cohen, A. (1992). 56	
<b>Tabla 17.</b> Propiedades mecánicas Latón UNS C38500. Adaptado de Cohen, A(1992)... .....	56
<b>Tabla 18.</b> Composición química medida y nominal de aleación de aluminio UNS A906061, porcentaje en peso. ....	70
<b>Tabla 19.</b> Composición química medida y nominal de aleación de bronce UNS C90700, porcentaje en peso. ....	70
<b>Tabla 20.</b> Composición química medida y nominal de aleación de latón UNS C 38500, porcentaje en peso. ....	70
<b>Tabla 21.</b> Propiedades mecánicas del aluminio UNS A906061 en estado de entrega (EE) y después de los tratamientos térmicos T4 y T6 (TT) obtenidas a partir de las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria. ....	85
<b>Tabla 22.</b> Propiedades mecánicas del bronce UNS C90700 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de homogenizado (TT) obtenidas a partir de las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria. ....	88



<b>Tabla 23.</b> Propiedades mecánicas del bronce UNS C38500 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de recocido (TT) obtenidas a partir de las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria. ....	91
--	----

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de fases correspondiente a la aleación AA6061. Fuente: Echavarria, A. y Orrego, G. (2012). ....	39
<b>Figura 2.</b> Microestructura de un aluminio UNS A906061 a) T6, 50 X. b) H0, 500 X. Fuente: Echavarria, A. y Orrego, G. (2012). ....	41
<b>Figura 3.</b> Placa de la aleación UNS A906061-F, de 38 mm (1,5 pulg.) de espesor, laminado en caliente (reducción del 91%). Fuente: Stevens, R. 1992). ....	41
<b>Figura 4.</b> Microestructura del bronce C90700 en estado de fundición a 50 micras. Fuente: Universidad de Florida. ....	52
<b>Figura 5.</b> Microestructura Bronce UNS C90700. Fuente: Savaşkan, T. y Alemdağ, Y. (2008) . ....	53
<b>Figura 6.</b> Diagrama de fases en equilibrio Cu-Sn. Fuente: Copper Development Association Inc. (2016). ....	55
<b>Figura 7.</b> Micrografías ópticas que muestran la distribución de las partículas de plomo en una barra de latón extruido y estirado (los puntos negros largos son partículas de plomo). Sección longitudinal (paralela a la dirección de extrusión). Fuente: Nogués, E. (2008). ....	57
<b>Figura 8.</b> Micrografías ópticas de las secciones transversales de una barra de latón extruido ( FeCl <sub>3</sub> sumergido 10 s) que muestran la estructura de fase . (A) Imagen de campo claro . (B) Imagen de campo oscuro. Fuente: Nogués, E. (2008). ....	57

<b>Figura 9.</b> Diagrama de fases en equilibrio Cu-Zn. Fuente: Nogués, E. (2008).....	58
<b>Figura 10.</b> Máquina de ensayos de tensión. Fuente: Askeland, D. (1998).....	60
<b>Figura 11.</b> Diagrama esfuerzo deformación en materiales dúctiles. Fuente: Askeland, D. (1998). .....	60
<b>Figura 12.</b> Encuellamiento de probeta. Fuente: Askeland, D. (1998).....	62
<b>Figura 13.</b> Especímenes Estándares para probetas redondas. Norma ASTM E8. Fuente: Propia del autor. ....	68
<b>Figura 14.</b> Microestructura de la aleación de aluminio UNS A906061 en estado de entrega. Ataque 222. MO. 10 X. Fuente: Propia del autor.....	72
<b>Figura 15.</b> Microestructura de la aleación de aluminio UNS A906061 después del tratamiento térmico T4. Ataque 222. MO. <b>a)</b> 50 X. <b>b)</b> 100 X. Fuente: Propia del autor.	73
<b>Figura 16.</b> Aleación de aluminio UNS A906061 después del tratamiento térmico T4 y T6. Ataque 222. MO. <b>a)</b> 50 X. <b>b)</b> 10 X.....	74
<b>Figura 17.</b> Bronce UNS C90700. Estereoscopio 4 X. Ataque 51. Fuente: Propia del autor.....	76
<b>Figura 18.</b> Desarrollo de la macroestructura de una fundición durante la solidificación: a) Se inicia la nucleación, b) se forma la zona templada, c) un crecimiento preferencial produce la zona columnar y d) la nucleación adicional crea la zona equiaxial. Fuente: Askeland, D. 1998.....	77
<b>Figura 19.</b> Bronce UNS C90700 en estado de entrega. Ataque 51. MO. <b>a)</b> 50 X. <b>b)</b> 100 X. Fuente: Propia del autor. ....	78
<b>Figura 20.</b> Bronce UNS C90700 tratado térmicamente. Estereoscopio a 4 X. Fuente: Propia del autor. ....	79

<b>Figura 21.</b> Bronce UNS C90700 con homogenizado a 775 °C. Ataque 51. MO. <b>a)</b> 50 X. <b>b)</b> 100 X. Fuente: Propia del autor.....	80
<b>Figura 22.</b> Latón UNS C38500 en estado de entrega. Ataque 29. MO. <b>a)</b> 50 X. <b>b)</b> 100 X. Fuente: Propia del autor. ....	81
<b>Figura 23.</b> Latón UNS C38500 con recocido a 500°C. Ataque 51. MO. 10 X. Fuente: Propia del autor. ....	82
<b>Figura 24.</b> Latón UNS C38500 con recocido a 500°C. Ataque 51. MO. <b>a)</b> 50 X. <b>b)</b> 100 X. Fuente: Propia del autor. ....	82
<b>Figura 25.</b> Curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación UNS A906061 en estado de entrega (EE) y después de los tratamientos térmicos T4 y T6 (TT). Fuente: Propia del autor.....	84
<b>Figura 26.</b> Probetas aluminio UNS A906061 posterior al ensayo de tensión: a) probeta en estado de entrega. b) probeta con tratado térmicamente. Fuente: Propia del autor.....	86
<b>Figura 27.</b> Curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación UNS C90700 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de homogenizado (TT). Fuente: Propia del autor.....	87
<b>Figura 28.</b> Probetas bronce UNS C90700 posterior al ensayo de tensión: a) probeta en estado de entrega. b) probeta con tratado térmicamente. Fuente: Propia del autor .....	89
<b>Figura 29.</b> Curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación UNS C38500 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de recocido (TT). Fuente: Propia del autor. ....	90
<b>Figura 30.</b> Probetas latón UNSC 38500 posterior al ensayo de tensión: a) probeta en estado de entrega. b) probeta tratada térmicamente. Fuente: Propia del autor .....	92



## RESUMEN

Muestras de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS 38500 fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecido T4 y T6, homogenizado y recocido respectivamente. Las muestras fueron caracterizadas química y microestructuralmente en estado de entrega y con tratamientos térmicos, usando espectroscopia de emisión óptica, microscopia óptica y medidas de dureza en escala Brinell y Rockwell B. Se realizaron ensayos de tensión acorde a la norma ASTM E8 en una máquina universal de ensayos con capacidad de 300 KN. A partir de los gráficos de esfuerzo normal en función del desplazamiento unitario se calculó el módulo de Young, esfuerzo último, esfuerzo de fluencia, resiliencia, tenacidad, elongación y reducción de área.

Los resultados del análisis químico mostraron que las tres aleaciones no ferrosas cumplen con los rangos de composición establecidos en cada norma UNS.

La caracterización microestructural mostró que en el estado de entrega el aluminio posee una matriz de aluminio y precipitados de  $Mg_2Si$ . El bronce se encuentra bruto de fundición formado por las fases  $\alpha$  rica en cobre y  $\alpha+\delta$  producto de una transformación eutectoide. El latón está constituido por una fase  $\alpha$  y una fase  $\beta$  con precipitaciones de plomo.

Luego de realizar los tratamientos térmicos, se evidenció en la aleación de aluminio, precipitados de  $Mg_2Si$  localizados en los contornos de grano de la matriz rica en aluminio. El homogenizado produjo maclas y recristalización de granos en el bronce,

mientras que en el latón el recocido disminuyó la cantidad de los precipitados de plomo para la aleación de latón.

Adicionalmente, los resultados de los ensayos de tensión mostraron que el tratamiento térmico de envejecido realizado al aluminio y el tratamiento de homogenizado aplicado al bronce redujeron las propiedades mecánicas en comparación a las muestras en estado de entrega, sin embargo, el tratamiento de recocido aumento considerablemente las propiedades mecánicas del latón.

**Palabras Clave:** Propiedades mecánicas, microestructura, aluminio, bronce latón, envejecido, homogenizado, recocido.

### **ABSTRACT**

Specimens of aluminum UNS A906061, bronze UNS C90700 and brass UNS 38500 were submitted to the heat treatments of aging, homogenizing and annealing respectively. The chemical composition of the alloys was verified by optical emission spectroscopy and the microstructure before and after heat treatments were characterized by means of optical microscopy, Rockwell B and Brinell hardness measurements. In addition, Tensile test were carried out in order to measure some mechanical properties from the stress – strain curve according to the ASTM E8 standard. The chemical results showed that the three non-ferrous alloys fulfill the composition ranges established in each UNS standard. The aluminum microstructure is composed of an aluminum matrix with  $Mg_2Si$  precipitates. The bronze microstructure is composed by a copper rich  $\alpha$  phase and a  $\alpha+\delta$  phases produced by an eutectoid transformation. The brass is composed

of a  $\alpha$  and  $\beta$  phases. The tensile test results showed that both the aging and the homogenizing heat treatments decreased the mechanical properties of aluminum and bronze respectively in comparison to the non-heat treated condition, however, the annealing heat treatment increased considerably the mechanical properties of the brass.

**Key words:** Mechanical properties, microstructure, aluminum, bronze, heat treatments

## **OBJETIVOS**

### **✓ Objetivo general**

- Medir propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500 a partir de ensayos de tensión bajo norma ASTM E8.

### **✓ Objetivos específicos**

- Caracterizar química y microestructuralmente las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500.
- Realizar ensayos de tensión a las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500 bajo norma ASTM E8.
- Establecer relaciones entre microestructura y propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500.
- Crear una base de datos de propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500 estudiadas en esta investigación.



## INTRODUCCIÓN

Los metales y aleaciones no ferrosas incluyen una amplia gama de materiales, desde metales comunes como el aluminio, hierro, cobre y magnesio hasta aleaciones de alta resistencia y temperatura. En términos generales, son de mayor costo respecto a los metales ferrosos y polímeros. Los metales y sus aleaciones son considerados como los materiales de mayor uso y aplicación en la ingeniería y su adecuado desempeño depende tanto de las propiedades mecánicas como físicas, resaltando entre las más importantes la buena resistencia a la corrosión, elevada conductividad térmica y eléctrica, baja densidad, facilidad de fabricación y manufactura, soldabilidad y fácil maquinado.

Las aleaciones ferrosas y las fundiciones utilizan tratamientos térmicos similares para controlar las microestructuras y las propiedades mecánicas, sin embargo el comportamiento y las estructuras de las aleaciones no ferrosas tienen diferencias enormes, por lo que es necesario saber de antemano que se pretende obtener tanto en las propiedades mecánicas como en su microestructura, a sabiendas de la aplicación ingenieril a la que dicha aleación será sometida.

El aluminio es el segundo metal más abundante en la tierra, su baja densidad y resistencia comparado con los aceros es la característica más llamativa de dicho material así como su buena conductividad eléctrica y térmica, prácticamente el alambrado de transmisión de alto voltaje está hecho en aluminio. Su apariencia, facilidad de conformado y su no toxicidad, permiten que se pueda aplicar desde utensilios domésticos hasta fuselajes aeroespaciales. De igual forma, el cobre y sus aleaciones conforman uno de los mayores grupos de aleaciones comerciales disponibles

actualmente en el mercado, estas aleaciones a base de cobre son más pesadas que el hierro, poseen excelente ductilidad, alta resistencia, rigidez, conductividad eléctrica y térmica, presentan buena soldabilidad, son de carácter diamagnético, auto lubricantes, resistentes a la corrosión y no producen chispa por lo que una de sus principales aplicaciones es como herramientas, cerca de gases y fluidos inflamables. Dependiendo de la necesidad, van desde objetos ornamentales en casa hasta cojinetes de alta durabilidad. Las aleaciones de cobre dependiendo de sus aleantes pueden ser considerados como latones cuando se le añade zinc o bronce cuando se le suma estaño. En este trabajo se evaluó el efecto de los tratamientos térmicos en la microestructura y propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500.

## 1. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1. ALEACIONES NO FERROSAS

Los metales y sus aleaciones son considerados como los materiales de mayor utilización en la ingeniería. De manera general los metales se clasifican en ferrosos, aquellos que tienen como elemento principal el hierro, y los no ferrosos que no poseen hierro como elemento aleante principal [Shackelford J, 1995].

Moore, H. y Kibbey, D. (1987) explicaron que el uso de metales y aleaciones no ferrosas en general puede justificarse con base en alguna propiedad especial que ellos no tengan o alguna ventaja de proceso que ofrezca frente a otro material. **La relación de resistencia a peso** con frecuencia es importante en este tipo de metal. El aluminio, el magnesio y el berilio (uno de los metales más raros), tienen densidades de un cuarto a un tercio de la del acero. Aunque la resistencia, más bien que el peso es la base de diseño más frecuente, en muchos casos, en particular en la fundición, el proceso limita el espesor mínimo de la sección y los productos hechos con metales ferrosos son mucho más fuertes que lo requerido en el diseño. El mismo producto hecho con metal no ferroso más débil, pero menos denso, puede tener todavía la resistencia adecuada con menos peso. Aun cuando el costo por libra del metal no ferroso puede ser mayor, el costo final de los productos puede ser comparable. Sobre una base de resistencia a peso, el acero endurecido es todavía superior a la mayoría de los metales no ferrosos, pero algunas aleaciones no ferrosas con resistencia ligeramente menor por unidad de peso puede ofrecer otras propiedades gran importancia que las del acero endurecido. Entre las

aleaciones que se muestran en la Tabla 1, las clasificadas como aleaciones ligeras tienen de un cuarto a un tercio de la densidad del hierro o acero. Las llamadas aleaciones pesadas tienen densidades aproximadas de una a una y media veces la del acero.

**Tabla 1.** Clasificación de las aleaciones no ferrosas con base en la densidad. Adaptada de Moore, H. y Kibbey, D. (1987)

<b>ALEACIONES LIGERAS</b>	<b>ALEACIONES PESADAS</b>
Base de aluminio	Base de cobre
Base de magnesio	Base de zinc
Base de titanio	Base de níquel
Base de berilio	Base de estaño
	Base de plomo

En lo referente a **la resistencia a la corrosión** la mayoría de los metales no ferrosos posee una resistencia superior a todos los metales ferrosos, con excepción del acero inoxidable, el cual no ofrece la ventaja del costo de los aceros simples al carbono de baja aleación. Esta resistencia a la corrosión es la razón más frecuente para seleccionar los metales no ferrosos ya que ofrecen una gran importancia debido a que no solo afecta las propiedades mecánicas del material, sino también a la apariencia de un metal que depende de su resistencia a la corrosión. Cuando la apariencia es importante, los metales ferrosos comúnmente usados casi siempre requieren alguna clase de acabado y tratamiento de protección de superficies. En muchos metales no ferrosos no son necesarios los acabados de protección, aun bajo condiciones que producirían corrosión severa en el acero. La apariencia distintiva de muchos metales no ferrosos es muy deseable en muchos productos.

**Excelentes propiedades térmicas y eléctricas.** Aunque el hierro es el material magnético de uso más frecuente, que tiene alta permeabilidad y baja histéresis magnética, el hierro puro es un material pobre para imanes permanentes. Los mejores imanes permanentes usan aleaciones con alto contenido de níquel, aluminio y cobalto. La plata, el cobre y el aluminio tienen conductividades eléctricas y térmicas mucho más altas que cualquiera de los materiales no ferrosos y comúnmente se usan en vez del acero cuando son importantes esas propiedades. (Moore, H. y Kibbey, D. 1987.)

Una de las aleaciones no ferrosas que más se produce es el aluminio, debido a las propiedades que posee siendo muy utilizado en diferentes campos. Por tal razón se utiliza el Sistema Estadístico IAI que está diseñado para cumplir con el requisito de que, los datos que se generan de cada empresa sólo se incluirán dentro de los totales debidamente agrupados por áreas geográficas declaradas y no se informa por separado World Aluminium (2016). En la Tabla 2 se evidencia la producción mundial del aluminio comprendida entre el mes de enero y marzo del 2016.

**Tabla 2.** Producción mundial del aluminio Enero 2016 - marzo 2016. Cifras en miles de toneladas métricas de aluminio. Adaptada de World Aluminium (2016).

Periodo 2016	África	Asia (Sin China)	China	GCC	Norte América	Sur América	Europa Oeste	Europa Este y central	Oceanía	Total
<b>Marzo</b>	142	275	2620	442	329	115	339	337	167	4766
<b>Febrero</b>	132	259	2070	413	344	107	299	317	156	4097
<b>Enero</b>	141	277	2480	438	368	113	321	338	169	4645

### **1.1.1. Tratamientos térmicos en aleaciones no ferrosas.**

El tratamiento térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final, sin embargo estos no modifican la composición química de los materiales pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales, la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas (Garza M.1999).

Según Brooks, C. (1991) los principios que rigen el tratamiento térmico de metales son aplicables tanto para aleaciones ferrosas y aleaciones no ferrosas, no obstante en la práctica existen diferencias y por tal razón es conveniente tratar como temas separado las peculiaridades de las aleaciones de cada clase en su respuesta a un tratamiento térmico. En las aleaciones no ferrosas, las transformaciones eutectoides que desempeñan un papel destacado en los aceros, rara vez se encuentran, por lo que los principios asociados con diagramas de temperatura y tiempo de transformación no se tienen en cuenta en aleaciones no ferrosas.

Por consiguiente, para las aleaciones no ferrosas comercialmente se emplea una variedad de procesos, los tratamientos más comunes se explican a continuación:

- **Endurecimiento por precipitación o por envejecimiento**

Este tratamiento térmico normalmente se usa para incrementar la resistencia en aleaciones de aluminio, produce una dispersión uniforme de precipitado coherente, fino y duro, en una matriz blanda y dúctil. Este consiste en tres pasos:

✓ *Tratamiento de solubilización: Disolución de los elementos solubles.*

Para tomar ventaja de una reacción de endurecimiento por precipitación es necesario producir una solución sólida, su objetivo es llevar a solución las cantidades máximas disponibles de los elementos aleantes que permitan incrementar la dureza en la aleación.

El proceso consiste en calentar la aleación a una temperatura lo suficientemente alta y por un tiempo determinado para darle una homogeneidad a la solución sólida. La temperatura comercial nominal de un tratamiento de solubilizado, está determinada por los límites de composición de la aleación y una permitida variación de temperatura no intencional. Aunque los intervalos normalmente listados permiten variaciones de  $\pm 6^\circ\text{C}$  de la temperatura nominal, algunas aleaciones altamente aleadas, de dureza controlada o alta resistencia, requieren que la temperatura sea controlada dentro de límites más estrictos.

El tiempo requerido a la temperatura del tratamiento de solubilizado para un satisfactorio grado de solución de los elementos no disueltos, o de los constituyentes de la fase precipitada para lograr una buena homogeneidad es función de la microestructura previa al tratamiento térmico. Este tiempo puede variar desde menos de un minuto para hojas delgadas hasta 20 horas para fundiciones en grandes moldes de arena o yeso (Askeland, D. 1998).

✓ *Enfriamiento rápido: Obtención de una solución sólida sobresaturada.*

El enfriamiento rápido es en muchas ocasiones el paso de operación más crítico. El objetivo del enfriamiento es preservar la solución sólida formada a la temperatura del

tratamiento de solubilizado a través de una rápida caída de temperatura, usualmente cerca de la ambiente. Esto no sólo aplica a átomos del soluto retenidos, sino también a cierto número mínimo de sitios vacantes en la red que ayudan a promover la difusión a baja temperatura requerida para la formación de zonas y precipitados. Los átomos que precipitan en cualquier borde de grano, dispersos u otras partículas que migran tal como las vacancias con extrema rapidez a regiones desordenadas, son irrecuperablemente perdidos para propósitos prácticos y fracasan en el reforzamiento de la aleación.

En muchos casos para evitar aquellos tipos de precipitados que son perjudiciales para las propiedades mecánicas o la resistencia a la corrosión, la solución sólida formada durante el tratamiento de solubilizado debe ser enfriada muy rápidamente (sin interrupción) para producir una solución sólida sobresaturada a temperatura ambiente, que es la óptima condición para el endurecimiento por precipitación (Askeland, D. 1998).

✓ *Endurecimiento por envejecimiento.*

Después de un tratamiento de solubilizado y de un enfriamiento rápido el endurecimiento se hace a temperatura ambiente (envejecido natural) o con un tratamiento térmico de precipitación (envejecido artificial) el cual tiene un intervalo usualmente de 100 °C a 200 °C. Las temperaturas y tiempos de envejecimiento son generalmente menos críticos que en la operación de solubilizado y dependen de cada aleación en particular. En algunas aleaciones se presenta suficiente precipitación en unos pocos días a temperatura ambiente para permitir productos estables con propiedades que son adecuadas para muchas aplicaciones. Estas aleaciones a veces son tratadas térmicamente por precipitación para proveer un incremento en la resistencia y dureza en



productos trabajados y fundidos. Otras aleaciones con baja reacción de precipitación a temperatura ambiente se les dan siempre un tratamiento térmico de precipitación antes de usarse. En algunas aleaciones el trabajo en frío de materiales solubilizados y enfriados rápidamente hasta la temperatura ambiente incrementa grandemente su respuesta a tratamientos térmicos de precipitaciones posteriores. Se ha tomado ventaja de este fenómeno laminando o extruyendo para producir mejores propiedades mecánicas. De cualquier forma, si las elevadas propiedades son adecuadas para el diseño, el tratamiento de recocido puede ser evitado (Askeland, D. 1998).

- **Clasificación de los tratamientos en aluminio y aleaciones.**

La designación para un tratamiento básico consiste en una letra individual mayúscula. La subdivisión de los tratamientos básicos se indica con uno o más dígitos siguiendo a la letra, esos dígitos designan una secuencia específica de tratamientos que producen una combinación de propiedades en el producto. La designación para los tratamientos más comunes y su secuencia de operación usada para producir esos tratamientos se muestra a continuación.

- ✓ F: *Condición de fabricado*. Esto se aplica a los productos moldeados por trabajo en frío, trabajo en caliente, o procesos de fundición en la que no se emplea ningún control especial sobre las condiciones térmicas o de endurecimiento. Para productos forjados, sin límites de propiedades mecánicas.
- ✓ O: *Recocido*. Es el temple más suave de los productos de aleación forjados, se aplica a productos forjados que son recocidas para obtener menor resistencia en el temple. La letra O puede ser seguido por un dígito distinto de cero.

- ✓ W: *Tratados térmicamente en solución*. Es un temple inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico en solución. Las piezas y productos en bruto (designación F) de las aleaciones de aluminio se pueden mejorar mediante dos procedimientos distintos: a) por deformación en frío; b) por medio de tratamientos térmicos.
- ✓ H: *Endurecimiento por deformación*. Se aplica a productos susceptibles de incrementar sus propiedades mecánicas por medio de trabajo en frío (es decir, los productos han sido reforzados mediante endurecimiento por deformación), con o sin tratamiento térmico complementario para producir una cierta reducción en la resistencia. El primer dígito después de la H indica la secuencia específica de operaciones básicas.
- ✓ H1: *Solamente endurecido por deformación*; el segundo dígito designa la cantidad de trabajo en frío realizada, y el número 8 representa la condición de dureza total; por lo tanto, una dureza media es H14, una dureza de un cuarto es H12, etc. Los temples extra duros se designan con el 9.
- ✓ H2: *Endurecido por deformación y luego recocido parcialmente*; se aplica a productos trabajados en frío para obtener un temple más duro y luego, mediante recocido parcial, se les reduce su resistencia al nivel deseado.
- ✓ H3: *Endurecido por deformación y luego estabilizado*; Se aplica sólo a aleaciones que contienen magnesio a las cuales se da un calentamiento a baja temperatura para estabilizar sus propiedades (Bobart, J.1991).

Para el procedimiento de mejoramiento por deformación en frío, existen otras designaciones, pero en este trabajo sólo se mencionan las más comunes.

- ✓ T: Tratamiento de Solubilidad; se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementario, para producir temples estables.
- ✓ T1: Enfriamiento desde una temperatura elevada, provocando un proceso de envejecimiento natural.
- ✓ T2: Temple; o enfriamiento rápido después de la transformación en caliente (sin solubilización específica).
- ✓ T3: Tratamiento de solubilización, trabajado en frío.
- ✓ T4: Tratamiento de solubilización y envejecido naturalmente a condiciones estables.
- ✓ T5: Tratamiento térmico de precipitación. Enfriamiento desde una temperatura elevada en el proceso de conformado y envejecimiento artificial.
- ✓ T6: Tratamiento de solubilización y luego envejecimiento artificial.
- ✓ T7: Tratamiento de solubilización, temple y estabilización.
- ✓ T8: Tratamiento de solubilización, trabajado en frío y envejecimiento artificial.
- ✓ T9: Tratamiento de solubilización, envejecimiento artificial y trabajado en frío.
- ✓ T10: Enfriado directamente de un proceso de formado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido artificial (Bobart, J.1991).

- **Homogeneización de las piezas fundidas**

Uno de los tratamientos térmicos comerciales más importante es la homogeneización de las piezas fundidas, el cual se utiliza antes del procesamiento mecánico del lingote fundido y se aplica para igualar la temperatura en toda la aleación o para reducir el

efecto de segregación provocado por la composición química desigual. Este es aplicado en las aleaciones de cobre para mejorar la ductilidad de piezas fundidas en el proceso de fabricación, ocasionalmente son aplicadas para satisfacer requerimientos específicos de dureza, ductilidad o tenacidad.

Cabe destacar, que la homogeneización se usa con más frecuencia en las aleaciones que tienen un amplio rango de congelación, tal como el bronce al estaño, cobre níquelado y bronce de silicio. El tiempo y la temperatura requerida para el tratamiento de homogeneización varían con la aleación, el tamaño de grano de fundición y el grado de homogeneización deseado. Normalmente las temperaturas son superiores al rango del recocido, entre 50 °C de la temperatura de sólidos y el tiempo varía de 3 a 10 horas.

Sin embargo, la homogeneización cambia propiedades mecánicas tales como la resistencia última a la tensión, dureza y límite de elasticidad, las cuales disminuyen lentamente, mientras que la elongación a la fractura y encuellamiento incrementan hasta el doble del valor inicial.

Las aplicaciones típicas de homogenización son:

- ✓ Aleación C71900 (cobre-níquel-cromo): 1040 a 1065 °C por 4 a 9 h, para prevenir grietas, costuras y exceso de estructura de fibra en extrusión.
- ✓ Aleación C52100 y C52400 (bronces fosforados, 8 y 10 % Sn): 775 °C por 5 h, reduce la fragilización en barras que son trabajadas en frío.
- ✓ Aleación C96400 (fundición 70Cu-30Ni): 1000 °C por 2 h bajo una atmósfera controlada y se enfría a 400 °C seguido de aire frío (Cohen, A. 1991).

- **Aliviar esfuerzos.**

Es un proceso destinado para aliviar la tensión interna en los materiales o piezas sin afectar sensiblemente sus propiedades. Los tratamientos térmicos para aliviar el esfuerzo se aplican al cobre forjado, fundido o aleaciones de cobre. Durante el procesamiento o fabricación de cobre o aleaciones de cobre por trabajo en frío, la fuerza y aumento de la dureza, como resultado de la deformación plástica puede ir acompañada normalmente por deformación elástica y las tensiones residuales permanecen en el producto resultante, pudiendo así dar lugar a formación de grietas por corrosión en materiales almacenados o en servicio, una distorsión impredecible al momento de cortar o mecanizar y fisurar durante un proceso de soldadura.

El tratamiento térmico para aliviar el estrés se lleva a cabo a temperaturas inferiores a los utilizados normalmente para el recocido. Las temperaturas para el tratamiento de las estructuras soldadas son generalmente de 50 hasta 110 °C. (Cohen, A. 1991)

- **Recocido**

El recocido es un tratamiento térmico destinado para suavizar y aumentar la ductilidad y/o la dureza de metales y aleaciones, el recocido se aplica a productos forjados, durante y después del procesamiento del molino, y a piezas de fundición. El proceso incluye calentamiento, sostenimiento y enfriamiento, una descripción del proceso debe incluir adecuada velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo de sostenimiento, ambiente y velocidad de enfriamiento, puesto que cada uno puede afectar a los resultados.

El recocido de metal trabajado en frío se realiza calentando a una temperatura que produce recristalización y, si se desea iniciar el crecimiento de grano, se realiza un calentamiento más allá de la temperatura de recristalización.

El recocido está en función de la temperatura del metal y el tiempo de sostenimiento de la temperatura. A excepción de las aleaciones multifases, que incluyendo ciertas aleaciones de precipitación de endurecimiento, y aleaciones susceptibles al fuego de craqueo, las tasas de calentamiento y enfriamiento son relativamente poco importantes. Por otra parte, la fuente y aplicación de calor, el diseño del horno, la atmósfera del horno, y forma de la pieza de trabajo son importantes porque afectan el acabado, coste de recocido, y la uniformidad de los resultados obtenidos. (Cohen, A. 1991)

### **1.1.2. Aluminio y aleaciones de aluminio**

El aluminio es el segundo elemento metálico más abundante sobre la tierra, sin embargo, a finales del siglo XVIII era costoso y difícil de producir, convirtiéndose en un material importante en aplicaciones eléctricas y gracias a procesos para reducción electrolítica  $Al_2O_3$  de metal líquido permitió que el aluminio se convirtiera en uno de los materiales de ingeniería más ampliamente utilizado y económico. En Francia (1886), fueron apareciendo los primeros vehículos que funcionaron con motor de combustión interna, y el aluminio jugó un gran papel como material aplicado en el automovilismo, la electrificación requería enormes cantidades de metal conductor de poco peso para la transmisión a larga distancia y para la construcción de las torres, necesarias para soportar la sobrecarga de la red de cables que suministraban la energía eléctrica.

En unas pocas décadas se dio luz, a una industria completamente nueva que creció en asociación con el desarrollo de la industria de piezas de aluminio estructuralmente seguras, resistente a la fractura de los fuselajes de motores, y en última instancia, a los órganos de misiles y componentes de satélites. Con el tiempo, el aluminio creció en diversidad de aplicaciones a la medida en que prácticamente todos los aspectos de la vida moderna son afectados directa o indirectamente por su uso. (Askeland, D. 1998.)

### **Propiedades**

Entre las características más llamativas del aluminio se encuentra su versatilidad, debido a la gama de propiedades físicas y mecánicas que se pueden desarrollar a partir de aluminio de alta pureza refinado. Más de trescientas composiciones de aleación son comúnmente reconocidas, y muchas variaciones adicionales se han desarrollado a nivel internacional y en las relaciones proveedor consumidor.

Las propiedades del aluminio que hacen que este metal y sus aleaciones sea la más económica y atractiva para una amplia variedad de usos son: apariencia, peso ligero, fabricación, propiedades físicas, propiedades mecánicas, y resistencia a la corrosión. (Rooy, E. 1992).

#### **✓ Propiedades físicas**

El aluminio tiene una densidad de solamente  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , aproximadamente un tercio comparada con otros metales como el acero ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), cobre ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ), o de latón ( $8,53 \text{ g / cm}^3$ ). Se puede mostrar una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de entornos, aire libre, agua (incluyendo agua salada), productos petroquímicos, y muchos sistemas químicos, aunque las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la

tensión relativamente baja en comparación con las del acero, su resistencia específica, es decir, su relación resistencia-peso es excelente. A menudo, se utiliza este metal cuando el peso es un factor de importancia como en aeronaves y aplicaciones automotrices. (Askeland, D. 1998)

En la Tabla 3 se muestran las propiedades en valores nominales del aluminio puro.

**Tabla 3.** Propiedades del aluminio puro. Adaptado de Askeland. D. (1998).

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA – VALOR
COLOR	Blanco
ESTRUCTURA CRISTALOGRÁFICA	FCC Cubica centrada en las caras
DENSIDAD	2,699 g/cm <sup>3</sup>
CAMBIO VOLUMÉTRICO DURANTE LA SOLIDIFICACIÓN	6,70 %
CALOR DE COMBUSTIÓN	200 kcal/(atm g)
PUNTO DE FUSIÓN	660,2 °C
PUNTO DE EBULLICIÓN	2057 °C – 2480 °C
CALOR ESPECÍFICO	930 J
COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICO (10 <sup>6</sup> )	23 °C (20 °C – 10 °C)
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (VALOR MÁX.)	34 - 38 m/(Ωmm <sup>2</sup> )
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	80 – 230 W/(m K)
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	2,69 μΩ cm
SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (18°C)	0,63

### ✓ Propiedades químicas

El aluminio es un metal químicamente activo, esto quiere decir que se oxida rápido debido a la afinidad del oxígeno con el aluminio, una vez formada la capa de óxido en la superficie, ésta actúa como un escudo, dura y compacta, evitando de esta forma la progresión de la oxidación hacia el interior “pasivación del aluminio”. Lo cual hace que este material tenga grandes aplicaciones en la industria por la cualidad de no corroerse tan fácilmente.



El aluminio no es ferromagnético, una propiedad de importancia en las industrias eléctrica y electrónica. Es no pirofórico lo que es importante en aplicaciones que implican el manejo de materiales inflamables o explosivos, también es un material no tóxico que se usa rutinariamente en recipientes para alimentos y bebidas. Según el efecto que tienen los elementos aleantes sobre la resistencia a la corrosión, éstos se pueden clasificar en:

- Elementos que mejoran la resistencia a la corrosión: Cr, Mg y Mn.
- Elementos que empeoran la resistencia a la corrosión: Cu, Ni, Sn, Pb y Co.
- Elementos que tienen poca influencia: Si, Ti, Zn, Cd y Zr. (Palas, M. 2012).

#### ✓ **Propiedades mecánicas**

El principal problema del aluminio puro, es su baja resistencia mecánica, sin embargo, ésta puede mejorarse con elementos de aleación. Una vez obtenida la aleación de aluminio, puede seguirse endureciendo mediante tratamientos térmicos y/o someterse al proceso de forja, por otro lado, cabe destacar que el módulo de elasticidad del aluminio puro es, relativamente bajo y muy sensible al porcentaje de impurezas. En la Tabla 4 se puede observar algunas propiedades mecánicas del aluminio puro.

**Tabla 4.** Propiedades mecánicas del aluminio puro. Adaptado de Askeland. D. (1998).

<b>Propiedad</b>	<b>Característica – Valor</b>
Módulo de Elasticidad (Grado de Pureza 99.99 %)	64.200 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Elasticidad (Grado de Pureza 99.95 %)	69.000 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Rigidez	17.000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,32 – 0,36

## **Beneficios y desventajas del aluminio**

Las propiedades físicas y benéficas del aluminio puro son su alta conductividad eléctrica y térmica, comportamiento no magnético, excelente resistencia a la oxidación y corrosión. Este elemento reacciona ante el oxígeno, incluso a temperatura ambiente, para producir una capa extremadamente delgada de óxido que protege el metal subyacente de muchos entornos corrosivos.

El aluminio exhibe, sin embargo, un alto límite de endurecimiento, por lo que puede ocurrir falla por fatiga incluso en bajos esfuerzos. Debido a su baja temperatura de fusión, no trabaja bien a temperaturas elevadas, finalmente, las aleaciones de aluminio tienen baja dureza, lo que conlleva a una mala resistencia al desgaste (Askeland, D. 1998).

## **Clasificación de las aleaciones de aluminio para forja**

La clasificación de estos aluminios ha cambiado a través de los países y del tiempo originando dificultades al momento de su estandarización, las aleaciones para forja se conforman por deformación plástica con microestructuras y composiciones significativamente diferentes a las utilizadas en molde. Estas diferencias en las composiciones reflejan las diferentes necesidades de los dos procesos de fabricación. La Aluminium Association adoptó un sistema de designación numérico para el aluminio y las aleaciones de aluminio forjadas, consistente en cuatro dígitos. El primer dígito de la designación identifica el tipo de aleación, que se refiere al principal elemento. Para las aleaciones de forjado un sistema de cuatro dígitos se utiliza para producir una lista de familias de composición de forjado como sigue:

- Serie 1xxx, indica un aluminio sin alear de pureza 99.00 % o mayor.
- Serie 2xxx, cobre como elemento principal de aleación.
- Serie 3xxx, manganeso como elemento principal de aleación.
- Serie 4xxx, silicio como elemento principal de aleación.
- Serie 5xxx, magnesio como elemento principal de aleación.
- Serie 6xxx, magnesio y silicio son los elementos principales de aleación.
- Serie 7xxx, zinc como elemento principal de aleación, pero otros elementos como el cobre, magnesio, cromo y zirconio se pueden especificar.
- Serie 8xxx, aleaciones con estaño y algo de litio, caracterizando diversas composiciones.
- Serie 9xxx, sin uso (sin asignación hasta el presente).

El segundo dígito en el número de la aleación indica los límites de impureza, si el dígito es cero no contiene impurezas, si el valor es de uno a nueve indica un control especial de una o más impurezas.

Los últimos dos dígitos son significativos en la serie 1xxx, pero no en otras aleaciones. En las aleaciones 1xxx, la pureza mínima del aluminio se muestra por esos dígitos, por ejemplo la aleación 1150 significa una pureza del aluminio del 99.50 %, así mismo, la aleación 1300 significa una pureza de aluminio del 99.00 %.

En las series del dos hasta el ocho los últimos dos dígitos no tienen ningún significado en especial, sólo sirven para identificar las diferentes aleaciones en el grupo. (Rooy, E. 1992).

## **Aplicaciones.**

Las aplicaciones del aluminio son muy extensas, el aluminio de alta pureza 99.99 %, se utiliza en partes especiales de automóvil, en productos eléctricos, componentes de ingeniería, intercambiadores de calor, microcomponentes, recipientes para almacenamiento de químicos, en manejo y empaque de alimentos, incluyendo latas, partes ligeras de uso aeroespacial, trenes, carros, barcos, edificios, iglesias, señales de tráfico, componentes de ingeniería donde se requiere de peso ligero y resistencia a la corrosión (Garza, M.1999).

### **1.1.2.1. Aleación UNS A906061**

La aleación UNS A906061 o AA6061 es tratable térmicamente por pertenecer a la serie 6xxx y tener como elementos principales magnesio y silicio. Originalmente denominada "aleación 61s" fue desarrollada en 1935, tiene buenas propiedades mecánicas y para su uso en soldaduras, se emplea comúnmente en formas pre templadas como el 6061-O y las templadas como el 6061-T6 y 6061-T651. Esta aleación tiene mayor resistencia que la AA 6082 gracias a su contenido de cobre más alto y su contenido de hierro que le garantizan un tamaño de grano más refinado. Según la experiencia y la práctica industrial, se logran los mejores desempeños y la máxima dureza con 0,75% si y 1% Mg. (Metales y aluminios Unicornio. 2013)

Con tratamiento térmico de solubilizado y envejecido artificialmente (T6), dicha aleación ofrece las siguientes ventajas: Resistencia superior a las aleaciones 6063,

óptima conformación en frío y excelentes características para soldadura fuerte y al arco.

(Tecniaceros. Aluminio. 2013)

A continuación se muestran las composiciones químicas medida en peso en la Tabla 5 y las propiedades físicas nominales de la aleación de aluminio UNSA906061 en la Tabla 6.

**Tabla 5.** Composición química UNS A 906061. Adaptado de Cohen, A. (1992).

<i>Elemento</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>
<b>Porcentaje (%)</b>	0,4-0,8	0-0,7	0,15-0,4	0-0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0-0,25	0-0,15

**Tabla 6.** Propiedades físicas aluminio UNS A 906061. Adaptado de Tecniaceros. Aluminio. (2013).

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
<i>Densidad</i>	2,7 g/cm <sup>3</sup>
<i>Rango de fusión</i>	575-650°C
<i>Módulo de elasticidad</i>	69500MPa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0,33
<i>Coefficiente de dilatación (0 a 100°C)</i>	23,6 x 10 <sup>6</sup> °C <sup>-1</sup>
<i>Conductividad térmica (0 a 100°C)</i>	Temple T6: 167 W/m°C
<i>Resistividad a 20°C</i>	Temple T6: 4μocm
<i>Calor específico (0 a 100°C)</i>	940

## Aplicaciones

Una de las principales aplicaciones de esta aleación, es su elevada resistencia a la tracción, excelente maquinabilidad y apariencia, se utiliza en la industria militar para la fabricación de soportes de culatas de fusil, en la industria para la fabricación de moldes, troqueles, maquinaria, herramientas, vehículos, ultraligeros, vagones de ferrocarril, industria naval, piezas de bicicletas, muebles, oleoductos, estructuras de camiones,

construcciones navales, puentes, calderería, torres y postes, construcción de calderas, motoras, aplicaciones aeroespaciales, cobertura de rotores de helicópteros, remaches, etc. Entre otras ventajas se encuentran su excelente conductividad, baja densidad, nula toxicidad, no produce chispa y excelente resistencia a la corrosión. (Tecniaceros. Aluminio. 2013).

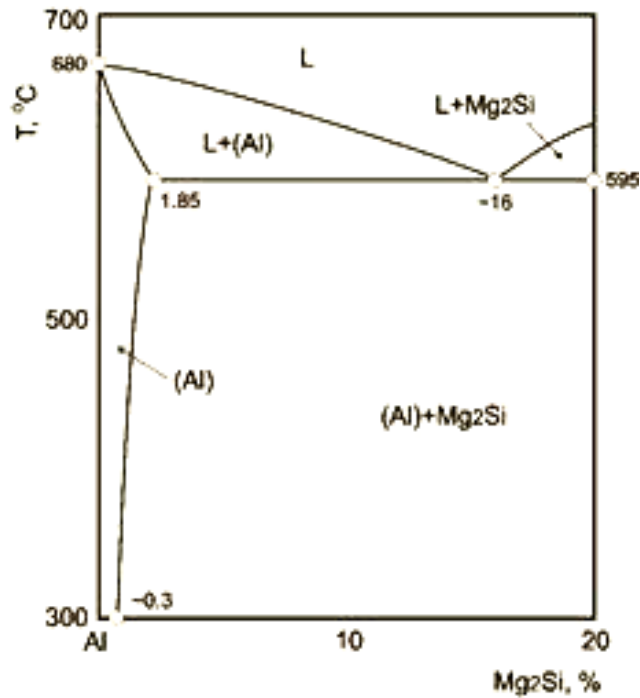
La Tabla 7 muestra las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio UNS A 906061.

**Tabla 7.** Propiedades mecánicas Aleación de aluminio UNS A 906061. Adaptado de Cohen, A. (1992).

<b>Tratamiento</b>	<b>Esfuerzo a tensión</b>	<b>Esfuerzo de fluencia</b>	<b>Esfuerzo a la Fatiga</b>	<b>Elongación</b>	<b>Dureza</b>
	MPa	MPa	MPa (5 $\times 10^8$ ciclos)	% 13 mm (0,5 in) diámetro	HB (500 kg , 10 mm diámetro)
<b>O</b>	124	55	62	30	30
<b>T4</b>	241	145	97	25	65
<b>T6</b>	310	276	97	17	95

### **Diagrama De Fases Al –Mg<sub>2</sub>Si**

La característica esencial de este diagrama reside en que el aluminio y el compuesto Mg<sub>2</sub>Si forman un sistema cuasi-binario que separa el diagrama ternario en dos partes como se aprecia en la Figura 1. Cada una de estas partes contiene un eutéctico definido como se muestra en la Tabla 8.



**Figura 1.** Diagrama de fases correspondiente a la aleación AA6061. Fuente: Echavarria, A. y Orrego, G. (2012).

**Tabla 8.** Eutécticos del sistema Al-Mg-Si. Adaptado de Echavarria, A. y Orrego, G. (2012).

<i>Eutéctico</i>	<i>Temperatura °C</i>	<i>Mg %</i>	<i>Si %</i>
$Liq = \alpha(Al) + Mg_2Si + Si...$	556	4,97	14
$Liq = \alpha(Al) + Mg_2Si + \beta Al_3Mg_2$	450	33,5	0,2

Dada las características propias de esta aleación no existe compuesto ternario, sino una mezcla de  $Mg_2Si$  y  $Al_3Mg_2$ , el compuesto  $Mg_2Si$  inicialmente considerado como un compuesto iónico, se comporta como un semiconductor, la solubilidad del compuesto  $Mg_2Si$  en aluminio varía de una manera muy importante en función de la temperatura y por el exceso de magnesio, esto se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Solubilidad del  $Mg_2Si$  en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz. Adaptado de Echavarria, A. y Orrego, G. (2012)

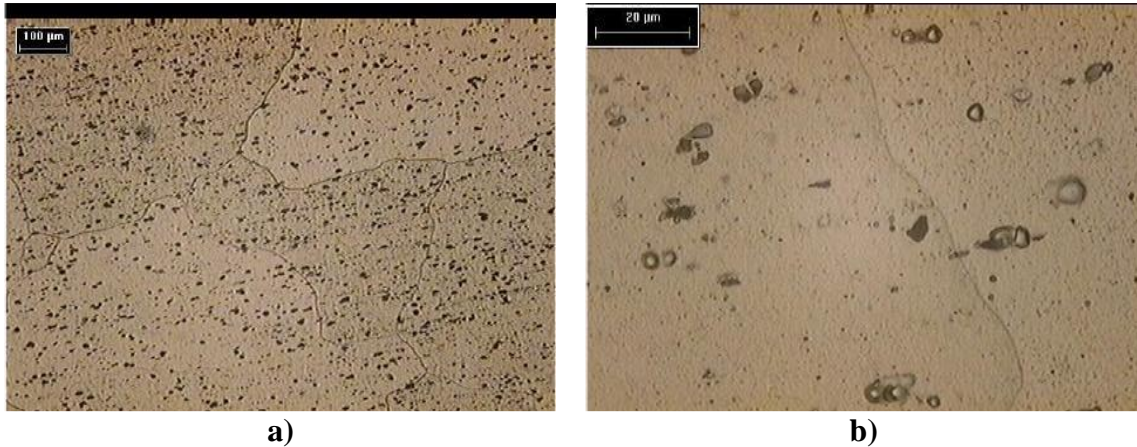
Temperatura °C	Exceso de magnesio				
	0%	0.20%	0.40%	0.80%	1%
<b>595</b>	1.85				
<b>535</b>	1.2	1.15	0.97	0.67	0.55
<b>500</b>	1.05	0.85	0.69	0.45	0.36
<b>400</b>	0.53	0.35	0.2	0	0
<b>300</b>	0.3	0.16	0.02	0	0
<b>200</b>	0.25	0.05	0	0	0

Por el contrario, el silicio no tiene efecto apreciable sobre esta solubilidad. Sin embargo, de acuerdo a la práctica de la fundición de estas aleaciones realizadas por Echavarria, A. y Orrego, G. (2012), se adiciona un exceso de silicio, con el objeto de evitar todo exceso de magnesio y asegurar de esta manera la solubilidad de todo el  $Mg_2Si$  y garantizar las máximas propiedades mecánicas y físicas de la aleación. Si la aleación contiene una baja concentración de 17 aleantes de Mg o Si, entonces el compuesto puede ser disuelto durante el tratamiento térmico. Si el porcentaje está en exceso el precipitado se distinguirá por la presencia de una estructura Widmanstatten. Por esta razón, el ajuste de la composición es vital para asegurar que no existe exceso de Mg o Si, puesto que dicha aleación contiene 0,7 % Fe, aparecen precipitados ternarios del tipo  $Fe_3SiAl_{12}$  (cúbica) o  $Fe_2Si_2Al_{19}$  (mono-clínica) formadas de la reacción eutéctica. Los precipitados claros y oscuros son del tipo  $Fe_3SiAl_{12}$ . Con bajos contenidos de silicio casi siempre el hierro está presente como  $Al_3Fe$ . Con el aumento de contenido de silicio entonces aparece la fase Al-Fe-Si. La microestructura de la aleación 6061 T6, se caracteriza por exhibir la fase alfa (más clara) con presencia de precipitados del tipo  $Fe_3SiAl_{12}$ .



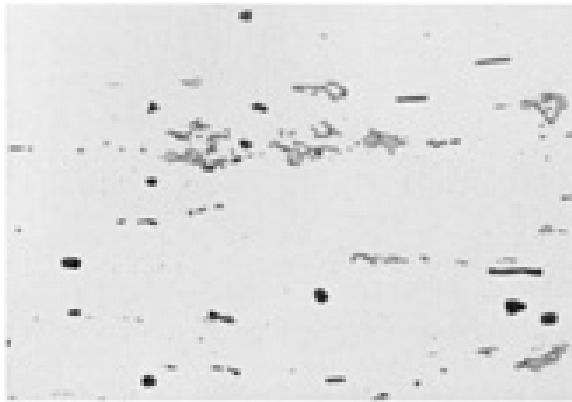
## Microestructura

En la Figura 2 y Figura 3, se destacan algunas imágenes de la microestructura del aluminio UNS A906061 con diferentes aumentos y/o tratamiento térmico.



**Figura 2.** Microestructura de un aluminio UNS A906061 a) T6, 50 X. b) H0, 500 X.

Fuente: Echavarria, A. y Orrego, G. (2012)



**Figura 3.** Placa de la aleación UNS A906061-F, de 38 mm (1,5 pulg.) de espesor, laminado en caliente (reducción del 91%). Fuente: Stevens, R. 1992).

De las figuras anteriores se puede observar claramente los bordes de los distintos granos que conforman la aleación UNS A906061, además se distingue la fase alfa y beta, los

precipitados en tonos grises estilo script corresponden a partículas de  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$  y los puntos negros corresponden a siliciuro de magnesio  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . (Stevens, R. 1992).

### **1.1.3. Cobre y aleaciones de cobre**

El cobre y las aleaciones basadas en el cobre se caracterizan en general por su resistencia mecánica moderada, elevada ductilidad y buena resistencia a la corrosión. El cobre presenta un solo estado alotrópico, de estructura cristalina cubica centrada en las caras (FCC) denominada fase  $\alpha$ . Con esta estructura el cobre sin alear es tan blando y dúctil que su mecanizado es difícil y presenta una capacidad para ser trabajado en frío casi ilimitada.

El cobre se obtiene principalmente a partir de piritas ( $\text{CuS} + \text{FeS}$ ) o por vía húmeda mediante la precipitación de cobre metálico en diluciones acuosas de sales de cobre. Luego de un tratamiento para convertir el hierro en forma de óxido e incorporarlo a la escoria, se obtiene un cobre de 98,5 % de pureza denominado Blíster. Este se puede someter a tratamiento térmico, el cual se realiza en hornos y se elimina óxidos e impurezas obteniéndose cobres del 99,5 % de pureza. Además se puede someter a tratamiento por electrolisis, donde el cobre se introduce en baño electrolítico como ánodo, disolviéndose y precipitando como cátodo. Estos cátodos de cobre alcanzan purezas del 99,95 % y como subproductos de la electrolisis se obtienen pequeñas cantidades de oro y plata. (Rodríguez, J. Castro, L & Romero, J. 2006.)

El cobre y sus aleaciones constituyen uno de los grupos de mayor comercialización de metales, los cuales son extensamente usados por su excelente conductividad eléctrica y térmica, su excepcional resistencia a la corrosión, su fácil fabricación, su buena fuerza y

resistencia a la fatiga aunque, generalmente no son magnéticos. El cobre puro es usado frecuentemente para la producción de cables, alambres, contactos eléctricos, y una gran variedad de partes que requieren pasar corriente eléctrica. La Tabla 10 muestra las características principales del cobre puro, en estado duro y recocido.

**Tabla 10.** Características principales del cobre puro, en estado duro y recocido.

Adaptado de Rodríguez, J et al., (2006).

Características	Estado de Suministro	
	Recocido	Duro
Peso específico (Kg/dm <sup>3</sup> )	8.9	8.9
Temperatura de fusión (0°C)	1.083	1.083
Coeficiente de dilatación lineal	16.5x10 <sup>6</sup>	16.5x10 <sup>6</sup>
Temperatura de Recocido (0°C)	500	
Temperatura de forja (0°C)	750-900	750-900
Solución de decapar	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 10 %	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 10 %
Carga de rotura R (Kg/mm <sup>2</sup> )	32	22
Alargamiento (%)	3 a 5	28 a 30
Calor específico de 0° a 100°C (cal/g°C)	0.092	0.092

Debido a sus excelentes propiedades, el total del consumo de cobre y aleaciones de cobre se destina en un 50 % a la producción de hilos conductores, un 18 % a otros productos de cobre puro, un 27 % a la producción de latones y el 5 % restante representa el consumo del conjunto de todas las demás aleaciones de cobre.

Las principales familias de aleaciones binarias de cobre son: latones (aleaciones Cu-Zn), bronce (aleaciones Cu-Sn), Cuproaluminio o bronce de aluminio (aleaciones Cu-Al) y cuproníqueles (aleaciones Cu-Ni). Todos estos grupos básicos de aleaciones pueden llevar en muchos casos adiciones de uno o más elementos diferentes con el objeto de mejorar determinadas propiedades o características de la aleación. Así se puede hablar de latones al plomo (aleaciones Cu-Zn-Pb), latones al aluminio (aleaciones Cu-Zn-Al),

alpacas (aleaciones Cu-Zn-Ni), bronce al níquel (Cu-Sn-Ni), entre otros. (Rodríguez, J *et al.*, 2006.)

Según Tyler, D. & Black, W. (1992) el cobre y ciertos latones, bronce y cuproníqueles son usados extensamente para radiadores de automóviles, intercambiadores de calor, sistemas de calefacción, paneles para absorber la energía solar, y varias de sus otras aplicaciones requieren una rápida conducción de calor a través de la sección del metal. Por su excepcional habilidad de resistir a la corrosión, el cobre, los latones, bronce y cuproníqueles son usados para tuberías, válvulas, y guarniciones en sistemas que llevan agua potable, procesos de agua, u otro fluido acuoso.

### **Aleaciones De Cobre**

Con base a Garcés, Henríquez & Tapia (2003) las aleaciones de cobre se clasifican de acuerdo a la composición química, obteniendo propiedades mecánicas diferentes y así la aplicación adecuada para cada aleación. Algunas aleaciones son:

#### **✓ Cobre débilmente aleados**

Los cobres débilmente aleados son aquellos que poseen bajo contenido de elementos de adición (menos del 1 %) y se utilizan cuando alguna de las propiedades de los cobres es insuficiente. Como por ejemplo, cuando se requiere mejor resistencia mecánica a temperaturas relativamente elevadas, resistencia a la corrosión, soldabilidad, resistencia al reblandecimiento y maquinabilidad. La Tabla 11 muestra la composición de cobres débilmente aleados y sus diferentes aplicaciones.

**Tabla 11.** Composición de cobres débilmente aleados y sus aplicaciones. Adaptado de Garcés, Henríquez & Tapia (2003).

COMPONENTE	APLICACIONES
<b>Cobre desoxidado con fósforo, con arsénico.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aparatos y tuberías para líquidos y gases relativamente corrosivos.</li> <li>• Tubos y placas tubulares para condensadores que trabajen con agua dulce y pura</li> </ul>
<b>Cobre tenaz con plata.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construcción de elementos de máquinas rotativas.</li> <li>• Placas para fotograbado que hayan de tener larga vida.</li> </ul>
<b>Cobre exento de oxígeno con plata.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En Electrónica, para uniones vidrio-metal.</li> <li>• Delgas de colectores.</li> </ul>
<b>Cobre con azufre.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piezas conductoras de corriente obtenidas por torneado.</li> <li>• Remaches, tuercas, tornillos</li> </ul>
<b>Cobre con telurio.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terminales de transformadores y de disyuntores.</li> <li>• Contactos y conexiones diversas.</li> </ul>

#### ✓ Aleaciones con alto contenido de cobre

Estas aleaciones se utilizan cuando no es indispensable una conductividad eléctrica muy elevada pero se requiere de un material con otras propiedades como la resistencia a la tracción, dureza, resistencia a la corrosión y resistencia a la oxidación. La Tabla 12 muestra la composición de aleaciones con alto contenido de cobre y sus aplicaciones.

**Tabla 12.** Composición de aleaciones con alto contenido de cobre y sus aplicaciones.

Adaptado de Garcés, Henríquez & Tapia (2003).

COMPONENTE	APLICACIONES
<b>Cobre-Cadmio y Cobre-Cadmio-Estaño.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líneas telefónicas</li> <li>• Conductores de líneas de ferrocarriles eléctricos.</li> </ul>
<b>Cobre-Bronce-alpaca</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monedas</li> </ul>
<b>Cobre-Berilio y Cobre-Berilio-Cobalto.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herramientas de cuproberilio para trabajos en presencia de materiales explosivos.</li> <li>• Matrices para plásticos</li> </ul>
<b>Cobre-Níquel-Silicio.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piezas para tracción eléctrica</li> <li>• Piezas varias de contactos eléctricos</li> </ul>
<b>Cobre-Silicio- Manganeseo.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diversas cajas y accesorios para la industria eléctrica.</li> <li>• Artículos que deben permanecer en contacto con agua de mar, aguas ácidas o atmósferas corrosivas</li> </ul>

## ✓ **Latones**

Los latones son aleaciones a base de cobre y zinc. Contienen de 5 a 46 % de este último metal y eventualmente, varios otros elementos en pequeñas proporciones. El color agradable de los latones varía del rosa al amarillo para contenidos crecientes de zinc. Su buena resistencia a la corrosión y su aptitud para tratamientos superficiales (barnices transparentes, pátinas, recubrimientos diversos), permiten realizar económicamente objetos de bello aspecto, de larga duración y de mantenimiento fácil. Dentro de este grupo de aleaciones, se distinguen:

### *Latones binarios cobre-zinc*

Los latones binarios tienen características muy específicas y sus aplicaciones están relacionadas con el porcentaje de zinc que contenga la aleación. Estos se utilizan en bisutería de fantasía, discos para monedas e insignias, quincallería, fundas de balas, aplicaciones industriales, instrumentos musicales, telas metálicas, radiadores de automóviles, accesorios de fontanería sanitaria y arquitectura.

### *Latones con plomo*

Los latones presentan grandes ventajas sobre todo para la fabricación de piezas de mecánica. Sin embargo, estas necesitan frecuentemente un maquinado importante, por lo que se buscó mejorar la maquinabilidad de los latones agregando reducidos porcentajes de plomo (1 a 3 %). Desde el punto de vista de la maquinabilidad, los latones con plomo están a la cabeza de todas las demás aleaciones. (Garcés, Henríquez & Tapia, 2003).

La aleación Cobre-Zinc y Plomo tiene variadas aplicaciones que pueden agruparse según la cantidad de Zinc y Plomo que contienen. Estos son usados en piezas roscadas para electrotecnia, engranajes, conexiones machos y hembras, circuitos eléctricos, piezas para instrumentos de precisión, relojería, válvulas para bicicletas, tornos automáticos de gran velocidad, accesorios para carpintería, piezas para automóviles, elementos mecánicos diversos, accesorios decorativos, marcos de puertas, ventanas y vitrinas, rieles para cortinas y tuercas de radio.

### *Latones especiales*

Los latones especiales se obtienen añadiendo uno o más elementos a los latones simples con el fin de mejorar las características de estos. Los elementos utilizados industrialmente, además del plomo, son el estaño, aluminio, manganeso, hierro, níquel, silicio y, en pequeñas proporciones, arsénico que se agregan para mejorar las propiedades mecánicas y aumentar la resistencia a ciertas formas de corrosión.

Los latones especiales más importantes son el latón con aluminio, latón almirantazgo, latón naval y latón de alta resistencia. Estos se utilizan en la fabricación de tubos de condensadores, tubos de evaporadores y de cambiadores de calor, quincallería naval, engranajes, tuberías para aire comprimido e hidráulica y perfiles arquitectónicos (Garcés, Henríquez & Tapia, 2003).

## ✓ Bronces

Los auténticos bronce son aleaciones de cobre y de estaño, con contenidos que varían del 2 al 20 % de estaño (Sn). Los bronce contienen frecuentemente otros elementos, tales como fósforo, zinc, níquel, plomo.

Por siglos, el hombre sólo conoció el cobre y el oro, el cual se empleaba en su estado nativo y los trataba como la piedra, es decir, los martillaba de acuerdo con la técnica corriente. Con el paso el tiempo se empezó a fundir los metales, hacer aleaciones y a darles forma.

Con la aparición del bronce la metalurgia adquiere una gran importancia, trajo transformaciones sociales y generó clases sociales como las de los guerreros y los nobles. La transformación de las armas, de la piedra al bronce y posteriormente, del bronce al hierro, modificó las relaciones entre los pueblos y favoreció las grandes invasiones. Como consecuencia de esto, desapareció el aislamiento primitivo y se fomentó el comercio.

Se puede distinguir dos familias de aleaciones de bronce, los bronce binarios que se dividen a su vez en bronce forjados y bronce moldeados. Y los bronce complejos que se dividen en bronce con Zinc y bronce con Plomo.

Los usos del Bronce son variados, pero ellos dependen de sus excelentes propiedades como la resistencia a la corrosión (por esto se considera apropiado para la fabricación de accesorios que deben estar en contacto con vapores o productos químicos), su buena maleabilidad y sus propiedades mecánicas y eléctricas. El bronce es muy utilizado en alambres para telas mecánicas, tubos flexibles y tubos ondulados, cadenas, campanas y aplicaciones navales. (Garcés, Henríquez & Tapia, 2003).



### ✓ Cuproaluminios

Los cuproaluminios son aleaciones de cobre y aluminio con 5 a 11 % de aluminio. Algunos tipos contienen hierro, níquel o manganeso. La Tabla 13 muestra las aplicaciones de los cuproaluminios, los cuales dependen de sus características.

**Tabla 13.** Aplicaciones de los cuproaluminios de acuerdo a sus características.

Adaptado de Garcés, Henríquez & Tapia (2003).

CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
Resistencia a la corrosión	<ul style="list-style-type: none"><li>• Industria Papelera</li><li>• Industria Petroquímica</li></ul>
Buen comportamiento en caliente	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tuberías de gases de escape</li><li>• Rejillas para hornos de gas</li></ul>
Resistencia mecánica a temperatura ambiente	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matrices y punzones para embutición</li></ul>
Resistencia mecánica a baja temperatura	<ul style="list-style-type: none"><li>• Piezas diversas de aparatos que trabajan a baja temperatura</li></ul>
Buena fricción	<ul style="list-style-type: none"><li>• Engranajes y tornillos</li><li>• Rodamientos</li></ul>
Amagnetismo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cadenas de anclas</li><li>• Armaduras para hormigón armado</li></ul>
Ausencia de chispas en el choque	<ul style="list-style-type: none"><li>• Refinerías de petróleo</li><li>• Fábricas de pinturas</li></ul>
Soldabilidad	<ul style="list-style-type: none"><li>• Placas tubulares</li><li>• Rotores de bombas</li></ul>
Aspecto atractivo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rejas y pasamanos de escaleras</li><li>• Estatuas</li></ul>

### ✓ Cuproníqueles

Se designa con el nombre de Cuproníqueles a las aleaciones con menos del 50 % de níquel. Los Cuproníqueles propiamente dichos tienen contenidos de níquel que varían del 5 al 44 %. Tienen propiedades como la facilidad de conformación en frío y en caliente, facilidad de moldeo, buenas características mecánicas, incluso a bajas y altas

temperaturas, propiedades eléctricas especiales de los tipos con alto contenido de níquel, color plateado y aspecto atractivo, buena resistencia a la corrosión.

Los cuproníqueles son utilizados para hacer monedas, para la conducción de agua de mar, limpia y contaminada, estancada o en circulación rápida, en la protección de maderas, aparatos de medida, aparatos de calefacción y enfundado de cables sumergidos o expuestos a atmosferas corrosivas.

### **Alpacas**

Las alpacas son aleaciones de cobre, níquel y zinc, en diversas proporciones. Sus aplicaciones son muy diversas y están basadas, esencialmente, en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Se utilizan en piezas para equipos de telecomunicaciones, orfebrería, decoración, arquitectura, puertas, picaportes, barandillas, apliques, lámparas, cubiertos, entre otros.

### **Alpacas con plomo**

Debido a que las alpacas presentan una maquinabilidad relativamente baja, es necesario mejorar esta propiedad agregando plomo. Las alpacas con plomo pueden ser moldeadas. Sin embargo, se encuentran más frecuentemente, en forma de productos forjados, tales como chapas o barras que se prestan bien al maquinado, como llaves y bulones (Garcés, Henríquez & Tapia, 2003).

### 1.1.3.1. Bronce UNS C90700

El bronce UNS C90700 o SAE 65 también es conocido como bronce de engranes y coronas resistente a la corrosión. Este es adecuado para la realización de válvulas, cajas de bombas, cojinetes, tornillos sin fin, cuando el servicio es pesado y sea necesario un bronce muy duro para mediana velocidad. Posee una gran calidad antifriccional, muy buena elasticidad y conductibilidad eléctrica. Además, soporta altas temperaturas sin perder sus propiedades mecánicas. (Industrial Okendo. 2012).

La Tabla 14 muestra la composición química del bronce UNS C90700 o SAE65, mientras que en la Tabla 15 se observan sus propiedades mecánicas de esta aleación.

**Tabla 14.** Composición química del bronce UNS C90700 o SAE65. Adaptado de Industrial Okendo. (2012).

<i>Elemento</i>	<i>Cu</i>	<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Fe</i>	<i>Al</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>P</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>
<i>Porcentaje</i>	88-90	10-12	0-0.02	0-0.015	0-0.015	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.3	0-0.005	0-0.005

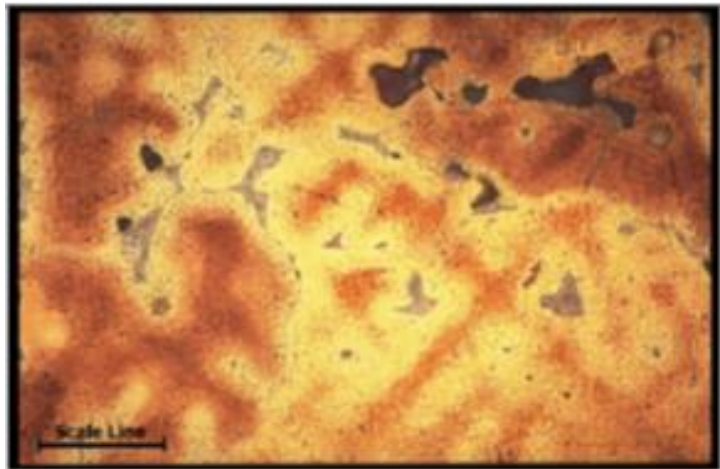
**Tabla 15.** Propiedades mecánicas del bronce UNS C90700 o SAE65. Adaptado de Cohen, A. (1992).

PROPIEDAD	VALOR
<b>Esfuerzo a tensión</b>	305 MPa
<b>Esfuerzo de fluencia</b>	150 MPa
<b>Elongación</b>	20% en 50 mm
<b>Dureza</b>	Fundido 80 HB; Molde permanente de fundición 102 HB
<b>Módulo de elasticidad</b>	Tensión, 105 GPa

## Microestructura

Los bronce al estaño son más fuertes y dúctiles que los latones rojos y semi rojos, además tienen una alta resistencia al desgaste y un bajo coeficiente de fricción comparado con el acero. Los bronce al estaño, con un 15.8 % de estaño, conservan una estructura de cobre alfa ( $\alpha$ ). El estaño fortalece en solución sólida al cobre, aunque tiene poca solubilidad a temperatura ambiente. Las transformaciones de fases a temperatura ambiente son lentas y usualmente no ocurren, por lo tanto estas aleaciones son aleaciones monofásicas.

En la Figura 4, se puede observar la microestructura del bronce C90700 en estado de fundición a 50 micras la cual consiste en núcleos de dendritas, así mismo, tiene una composición de gradiente de incrementar el estaño a medida que crecen. El último líquido a solidificar es el estaño, formando fases alfa y delta que ocupan las áreas entre los brazos de las dendritas.

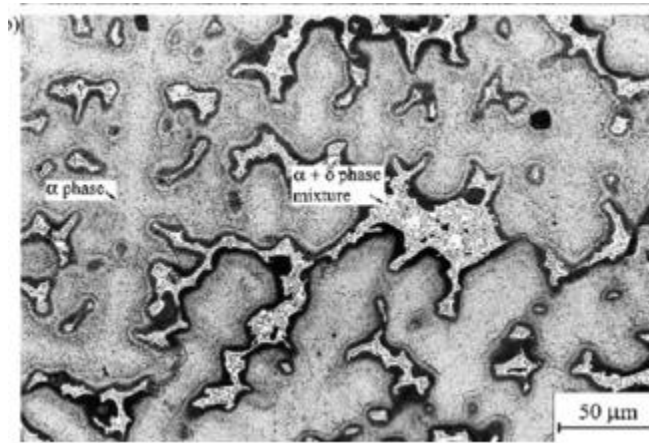


**Figura 4.** Microestructura del bronce C90700 en estado de fundición a 50 micras.

Fuente: Universidad de Florida.

La microestructura del bronce al estaño con plomo es similar a los materiales sin plomo con adiciones de partículas de plomo en medio de los límites de las dendritas. El plomo es prácticamente insoluble en cobre sólido y es solidificado como plomo casi puro en los límites de grano. (Copper Development Association Inc. 2016.)

Así mismo, en la Figura 5, se observa que la microestructura del bronce UNS C90700 ( $\text{CuSn}_{12}$ ) es rica en cobre ( $\alpha$ ) dendritas y eutectoide ( $\alpha+\delta$ ) fases. (Savaşkan, T. y Alemdağ, Y. 2008)



**Figura 5.** Microestructura Bronce UNS C90700. Fuente: Savaşkan, T. y Alemdağ, Y. (2008)

### Diagrama de Fases

Los grados de apoyo de cobre fundido se pueden clasificar en tres categorías metalúrgicamente:

- Aleaciones de solución sólida de una sola fase
- Aleaciones polifásicas
- Materiales compuestos

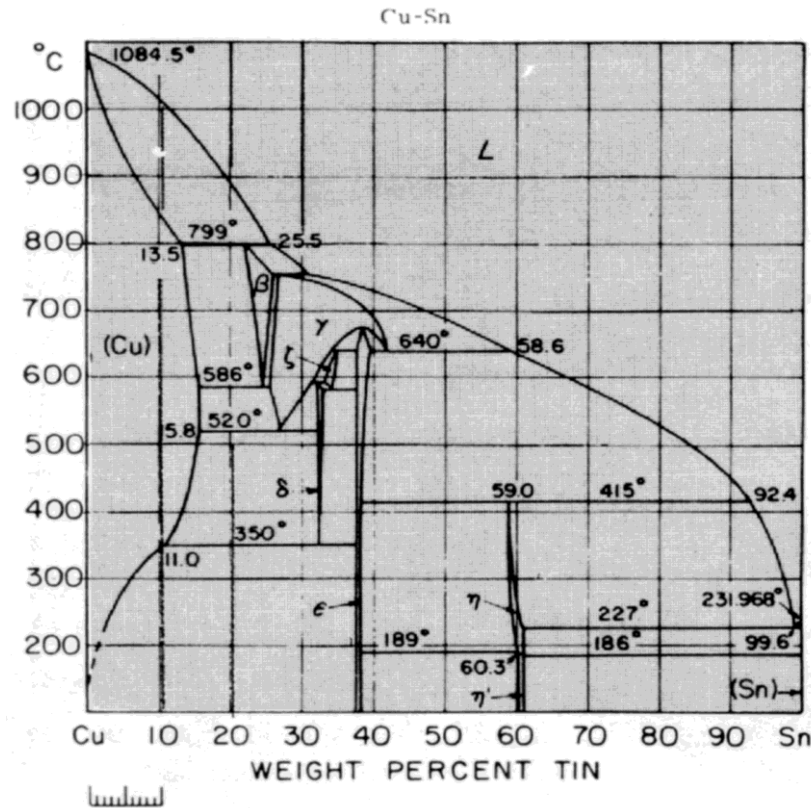
Para entender el rendimiento de diferentes aleaciones, primero se debe entender lo que ocurre con la estructura básica de cobre cuando se añaden pequeñas cantidades de metales de aleación. Las reacciones se producen durante la solidificación y enfriamiento de aleaciones de su estado fundido.

En términos simples, la disposición final de los metales de aleación respecto a la estructura normal del cobre FCC, determina las propiedades del material de la aleación.

Los metales de la aleación encuentran su lugar en la estructura del cobre en tres formas básicas:

1. Sustituyen a los átomos de cobre en la estructura FCC
2. Se combinan con el cobre y forman regiones localizadas (fases), donde la estructura cristalina es de una forma que difiere de la de cristal de cobre FCC.
3. Ellos son rechazados por la estructura de cobre de solidificación pero están atrapados dentro de los cristales de la aleación, ya que se congelan y crecen.

La investigación ha dado lugar a la representación gráfica de cómo reaccionan sistemas de aleaciones binarias simples. Esta representación se llama un diagrama de fases. Los diagramas de fase de algunos sistemas binarios correspondientes a bronce, muestran el comportamiento de elementos que normalmente se traduce en uno de los tres casos mencionados anteriormente de aleación. En el diagrama de fases en equilibrio de cobre y estaño de la Figura 6, se muestran los casos 1 y 2.



**Figura 6.** Diagrama de fases en equilibrio Cu-Sn. Fuente: Copper Development Association Inc. (2016).

De la anterior figura se observa que a menos de 11 % de estaño (al 8 % de estaño por ejemplo), una aleación mientras que se enfría se ve una solidificación en un intervalo de temperatura, convirtiéndose completamente sólida cuando la temperatura cae por debajo de aproximadamente 850 °C. En condiciones de equilibrio de un enfriamiento lento, la fase sólida que se forma es un cristal cúbica centrada en las caras (fase alfa). Los átomos de estaño sustituyen directamente en la estructura, en lugar de átomos de cobre. Los átomos de estaño tienen el efecto de fortalecimiento del cobre puro, ya que tensionan la estructura, es decir, que alteran la distancia habitual entre los átomos de cobre. (Copper Development Association Inc . 2016.)

### 1.1.3.2. Latón UNS C38500

El latón UNS C38500 es una aleación utilizada principalmente para maquinado por arranque de viruta (maquinas autómatas de producción en serie) adecuado para trabajo en caliente (forjado) y trabajos en frío ligeros. Se utiliza en pasadores, tornillería, conexiones de latón, tuercas, pernos, piezas fabricadas en tornos automáticos. (Cohen, A. 1992). La Tabla 16 muestra la composición química del latón UNS C38500, mientras que en la Tabla 17, se observan las propiedades mecánicas de este.

**Tabla 16.** Composición química Latón UNS C38500. Adaptado de Cohen, A. (1992).

<i>Elemento</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>Otros</i>
<i>Porcentaje (%)</i>	55-60	0-0.35	2-3.8	Resto	0.5 total

**Tabla 17.** Propiedades mecánicas Latón UNS C38500. Adaptado de Cohen, A. (1992).

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>Esfuerzo de tensión</b>	415 MPa
<b>Esfuerzo de fluencia</b>	140 MPa
<b>Elongación</b>	30 % en 50 mm
<b>Dureza</b>	65 HRB
<b>Módulo de elasticidad</b>	Tensión, 97 GPa

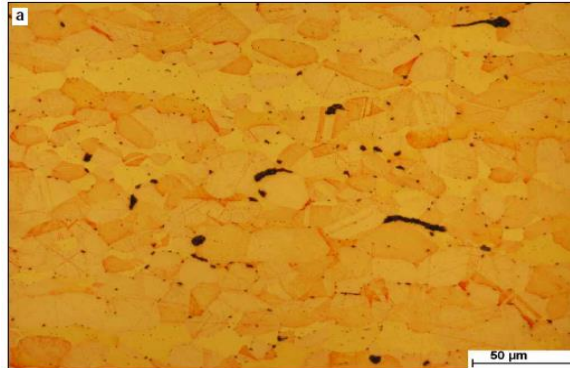
### Microestructura

En el estudio realizado por Nogués, E. (2008) donde todas las aleaciones presentan entre el 2,0 % y 3,1 % de Pb. Y se presenta en las micrografías ópticas en forma de esferas oscuras y esferas brillantes en la microscopia SEM (microscopia electrónica de barrido) apreciada en la Figura 7 y Figura 8. El plomo precipita en las primitivas regiones interdendríticas. El plomo se concentra básicamente en la fase  $\beta'$  y en los límites de la fase  $\alpha$ . En las imágenes de SEM se observan las mismas partículas esféricas (0,7-4,0

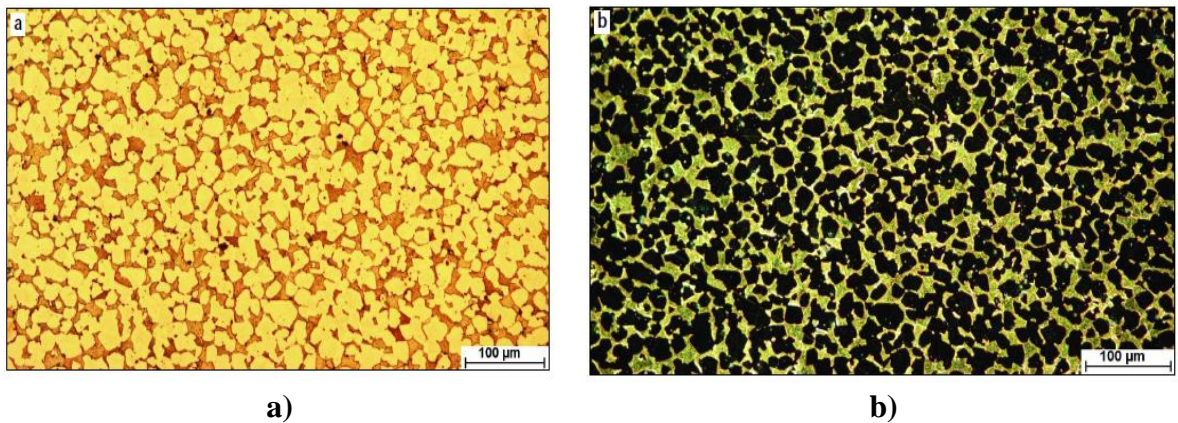


$\mu\text{m}$ ) de tonalidad clara y brillante. En el pulido de las probetas las partículas de plomo se desprenden y dejan, en su lugar, un poro de tono más oscuro.

Para revelar la estructura de fase, el grabado de inmersión se realizó utilizando férrico solución de cloruro de hierro mediante la disolución de 8,3 g  $\text{FeCl}_3$  en 10 ml de  $\text{HCl}$  y 90 ml de  $\text{H}_2\text{O}$ .



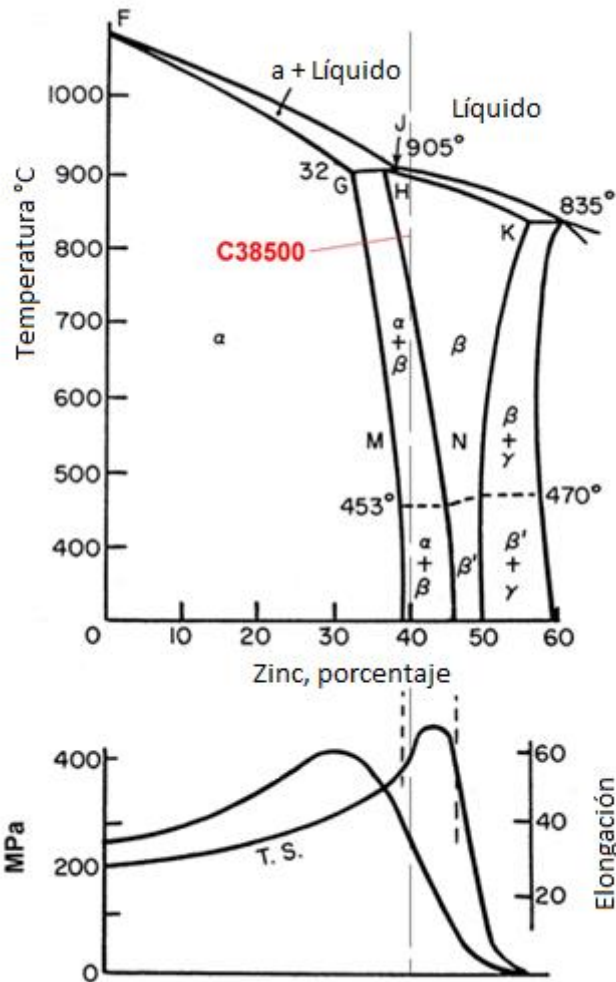
**Figura 7.** Micrografías ópticas que muestran la distribución de las partículas de plomo en una barra de latón extruido y estirado (los puntos negros largos son partículas de plomo). Sección longitudinal. Fuente: Nogués, E. (2008).



**Figura 8.** Micrografías ópticas de las secciones transversales de una barra de latón extruido (  $\text{FeCl}_3$  sumergido 10 s) que muestran la estructura de fase . (A) Imagen de campo claro . (B) Imagen de campo oscuro. Fuente: Nogués, E. (2008).

## Diagrama de Fases

En la Figura 9, se observa que la fase  $\beta$  está centrada en el diagrama Cu-Zn. La fase beta es estable entre el 39 % y el 55 % de Zn a 800 °C. Este rango decrece entre el 45 % y el 49 % de Zn a la temperatura de 500 °C.



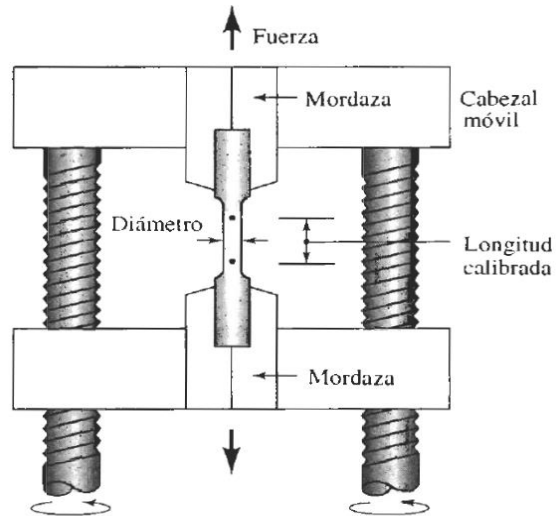
**Figura 9.** Diagrama de fases en equilibrio Cu-Zn. Fuente: Nogués, E. (2008).

Se observa que la fase  $\beta'$  a 250 °C pasa a través de una reacción eutectoide, formando  $\alpha$  y  $\gamma$ . Pero los límites de esta reacción no están claros y se necesita mucho tiempo para iniciarse reacción. En consecuencia, la fase  $\beta'$  puede considerarse estable a 20 °C. La

solución sólida  $\beta$  cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC). Por encima de 470 °C los átomos de zinc se localizan al azar en la red. A temperatura elevada la energía térmica hace vibrar los átomos, al enfriar el material los átomos de zinc se colocan en posiciones preferenciales. Por debajo de la temperatura crítica (depende de la composición), los átomos se mantienen en la posición preferencial. Entonces la fase  $\beta$  se dice que esta ordenada (orden de largo alcance) y forma una súper red. Esta fase ordenada se denomina  $\beta'$ . (Nogués, E. 2008)

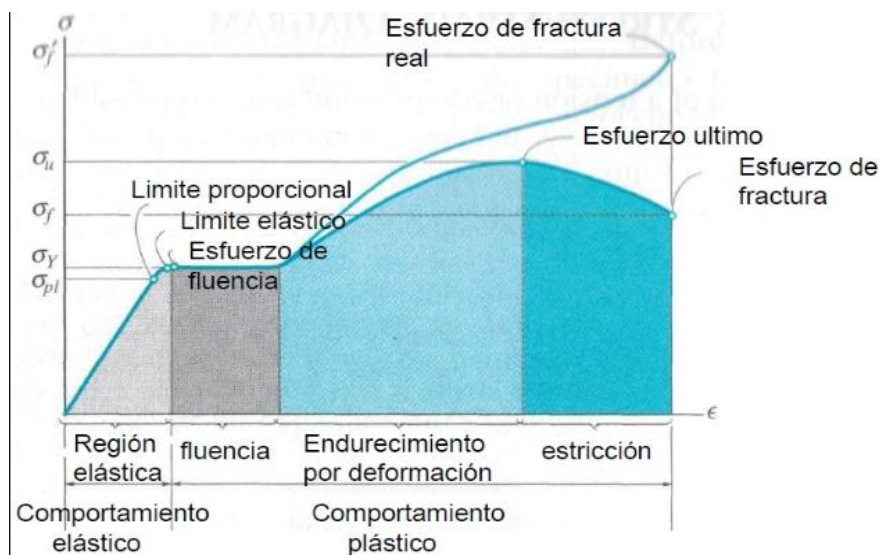
## **1.2. ENSAYO DE TENSION**

El ensayo de tension mide la resistencia de un material a una fuerza estatica o gradualmente aplicada, empleando un dispositivo de tensión a una probeta con medidas estandarizadas por la norma ASTM E8, la probeta se coloca en la maquina sujeta por mordazas concentricas, aplicandole una fuerza  $F$ , que se conoce como carga, para medir el alargamiento del material causado por la aplicación de fuerza en la longitud calibrada se utiliza un extensometro o en su defecto un comparador de caratula. En la Figura 10, se representa el montaje de la probeta sujeta por las mordazas.



**Figura 10.** Máquina de ensayos de tensión. Fuente: Askeland, D. (1998).

Con los datos obtenidos del ensayo de tensión, se puede realizar un diagrama esfuerzo vs deformación como el ilustrado en la Figura 11, donde se muestran las zonas y esfuerzos característicos para cada material. (Askeland, D. 1998)



**Figura 11.** Diagrama esfuerzo deformación en materiales dúctiles. Fuente: Askeland, D. (1998).

### **Esfuerzo y deformación ingenieriles.**

Para un material dado, los resultados de un solo ensayo son aplicables a todo tamaño y forma de muestras, si se convierte la fuerza en esfuerzo y la distancia entre marcas calibradas en deformación.

El esfuerzo y la deformación ingenieriles se define mediante las ecuaciones.

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \text{ Deformación ingenieril}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ Esfuerzo ingenieril}$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A_{ins}} \text{ Esfuerzo real}$$

Donde  $A_0$  es el área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo,  $L_0$  es la distancia original entre las marcas calibradas y  $l$  es la distancia entre las mismas después de haberse aplicado la fuerza  $F$ .

### **Propiedades obtenidas del ensayo de tensión**

A partir de un ensayo de tensión se puede obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad de un material.

- **Esfuerzo de fluencia o limite elástico.**

Es el esfuerzo al cual la deformación plástica se hace importante, en los metales, es generalmente el esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen. El esfuerzo de cedencia es por lo tanto el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material.

En algunos casos el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no se detecta fácilmente. En este caso, se determina un esfuerzo de cedencia convencional de 0,2 % es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva esfuerzo – deformación.

- **Esfuerzo Ultimo o de tensión**

El esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada es la resistencia a la tensión, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no se mantiene uniforme, en cierto momento, una región se deforma más que otra y ocurre una reducción local de importancia en la sección recta esta región localmente deformada se le conoce como zona de estricción

Dado que el área de la sección transversal en este punto se hace más pequeña, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación y se reduce el esfuerzo ingenieril, calculado a partir del área original  $A_0$ . La resistencia a la tensión es el esfuerzo al cual se inicia el encuellamiento o estricción en materiales dúctiles, el cual se produce, por lo general, en la mitad de la probeta. En la Figura 12, podemos observar la formación del encuellamiento luego de aplicar una fuerza correspondiente.



**Figura 12.** Encuellamiento de probeta. Fuente: Askeland, D. (1998)

- **Módulo de Young o módulo de elasticidad (E)**

Es la pendiente de la curva esfuerzo deformación en su región elástica. Esta es la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace de átomos, una pendiente muy acentuada o abrupta en la gráfica fuerza-distancia en la zona de equilibrio indica que se requieren de grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente. Por tanto el material tiene un módulo de elasticidad alto, las fuerzas de enlace y el módulo de elasticidad por lo general son mayores en materiales de punto de fusión alto. El modulo es la medida de la rigidez del material.

- **Resiliencia**

Es el área que aparece bajo la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación, es la energía elástica que un material absorbe o libera durante la aplicación y liberación de carga aplicada respectivamente. En este caso un comportamiento elástico lineal:

$$\text{Resiliencia} = 0,5 * \text{esf. de sedencia} * \text{defor. a la sedencia}$$

- **Tenacidad**

La tenacidad es la energía de deformación total que puede absorber o acumular, un material antes de alcanzar la rotura. En el gráfico esfuerzo deformación unitaria, es el área bajo la curva.

- **Ductilidad**

La ductilidad mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse, se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El % de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura.

$$\% \text{ de elongacion} = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El % de reducción de área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba. (Askeland, D. 1998)

$$\% \text{ de reducción de area} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100$$



## **2. MATERIALES Y METODOS**

Se presentan a continuación los materiales, procesos y equipos que se utilizaron en este trabajo.

### **Materiales**

Se emplearon tres aleaciones no ferrosas denominadas UNS A906061, UNS C90700 y UNS C38500. Estas aleaciones corresponden a una aleación de aluminio, un bronce y un latón respectivamente. Los tres materiales se recibieron en forma de barras redondas con diámetro de 12 mm. La composición química expresada en porcentaje en peso de cada una de las aleaciones se confirmó por espectrometría de emisión óptica en el laboratorio de fundición de la Universidad de Antioquia.

### **Tratamientos térmicos**

Los tratamientos térmicos se realizaron en un horno tipo mufla marca TERRIGENO MODELO D8 con tasa de calentamiento de 60 °C/min y controlador de temperatura digital perteneciente al laboratorio de materiales y procesos del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba. En todos los tratamientos, las aleaciones se introdujeron después de que el horno alcanzó la temperatura estipulada para cada tratamiento. El tiempo de sostenimiento se tomó una vez se estabilizó la temperatura del horno.

Los tratamientos fueron escogidos según la bibliografía adecuada para cada tipo de aleación (Cohen, A. 1991). A continuación se describirá el tratamiento y procedimiento para cada aleación.

- **Aluminio UNS A906061**

La aleación de aluminio fue sometida a un tratamiento térmico de envejecido realizado en dos etapas. En la primera etapa se realizó el tratamiento térmico T4 en el cual la aleación se sostuvo durante una hora a 550 °C y posteriormente enfriada en agua a temperatura ambiente. Después de una semana al aire libre, la aleación de aluminio se sostuvo a una temperatura de 175 °C durante ocho (8) horas y se enfriaron al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente. Este tratamiento es conocido como T6.

- **Latón UNS C38500**

Esta aleación fue sometida a un tratamiento de recocido a una temperatura de 500 °C durante una hora. Al término de este tiempo, se apagó el horno y se dejaron enfriar dentro del horno con la puerta cerrada hasta que se alcanzó la temperatura ambiente.

- **Bronce UNS C 90700**

La aleación de bronce C90700 fue sometida a un tratamiento térmico de homogenizado a 775 °C por 5 horas y dejándolas enfriar naturalmente hasta llegar a la temperatura ambiente.

### **Caracterización microestructural**

La microestructura de cada una de las aleaciones antes y después de los tratamientos térmicos fue evaluada utilizando un microscopio óptico de luz reflejada (MO) marca OLYMPUS GX41 dotado con cámara digital OMAX de 9.0 Megapíxeles y software de adquisición de imágenes ToupView V 3.7.

Se utilizaron probetas de 12 mm de diámetro y 30 mm de longitud de cada aleación y fueron sometidas a un proceso de desbaste con papeles de lija ASTM número 100, 280, 360, 600, 1000 y 2000. Las probetas se desbastaron sobre un vidrio plano y antes de pasar al siguiente papel de lija estas se lavaron con agua para no transportar las partículas desprendidas en el abrasivo anterior y se giraron 90° para cambiar la dirección de pulido. Posteriormente, se pulieron en paños impregnados con alúmina de 12 y 1  $\mu\text{m}$  usando la pulidora metalográfica Dace Technologies Nano 1000.

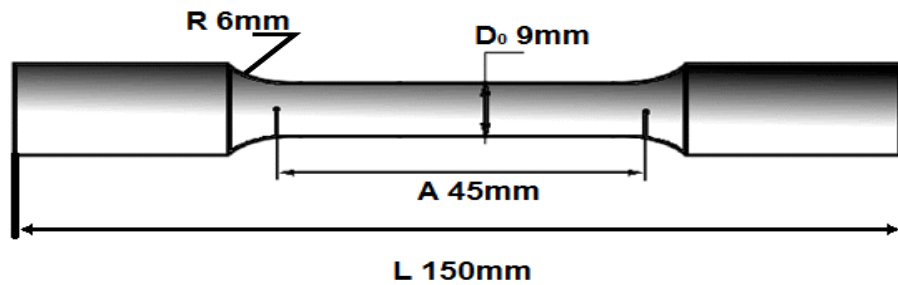
Los ataques químicos para revelar la microestructura de las aleaciones se seleccionaron con base en la norma ASTM E407. En el Anexo 1 se relaciona el tiempo y la composición de los ataques empleados para cada aleación. Estos procesos fueron realizados en el laboratorio de materiales y procesos del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba.

Adicionalmente a la evaluación microestructural, se realizaron medidas de dureza en escala Brinell y Rockwell B bajo norma ASTM E 18-03 para cada aleación en estado de entrega y luego del tratamiento térmico. Los datos reportados son los promedios de 5 mediciones. Este proceso se llevó a cabo en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad de Antioquia.

### **Ensayos de tensión**

Los ensayos de tensión se realizaron bajo norma ASTM E8M como métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos, empleando una máquina universal de ensayos marca MTS C45305 con una capacidad máxima de 300 KN, del laboratorio de materiales y procesos del Programa de Ingeniería Mecánica de la

Universidad de Córdoba. Las probetas ensayadas corresponden al espécimen 2 según lo estipulado en la norma ASTM E8, las cuales fueron maquinadas en el torno CJ6250 X1500, las dimensiones se muestran en la Figura 13.



**Figura 13.** Especímenes Estándares para probetas redondas. Norma ASTM E8. Fuente: Propia del autor.

Se ensayaron seis probetas por cada aleación, 3 en la condición de entrega y 3 tratadas térmicamente las cuales recibieron el tratamiento térmico respectivo después del proceso de maquinado. Estas fueron marcadas a una distancia de 30 mm en la zona de menor diámetro, dividiendo esta medida en partes iguales desde la mitad de la probeta, tabulando su longitud y diámetro inicial. Las probetas fueron seleccionadas de forma aleatoria por medio del software Microsoft Office Excel 2013.

Los ensayos fueron realizados empleando un extensómetro con un desplazamiento de mordazas de 0,03 mm/s, aplicando una precarga de 0,03 KN para asegurar las probetas evitando un posible deslizamiento al momento de realizar dicho ensayo. Iniciado el ensayo con los valores establecidos, la maquina se detiene luego de presentar la ruptura

de la probeta o al sensar una fluctuación del 30 % del valor de la carga máxima. Los datos fueron registrados en el software TW Elite de la máquina, tomando 50 datos por segundo, permitiendo la elaboración de la gráfica esfuerzo – deformación unitaria y así calcular las siguientes propiedades: Esfuerzo a tensión, esfuerzo de fluencia, módulo de Young, ductilidad, tenacidad y resiliencia, empleando las ecuaciones mencionadas anteriormente o directamente en la gráfica obtenida, identificando las zonas elásticas y plásticas en dicha gráfica para cada aleación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL

##### 3.1.1. Composición química

Los resultados de las mediciones de composición química por espectrometría de emisión óptica son la media de cinco datos, los cuales junto al valor nominal de cada aleación se relacionan en las Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20, para las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C 38500 respectivamente.

**Tabla 18.** Composición química medida y nominal de aleación de aluminio UNS A906061, porcentaje en peso.

<i>Elemento</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
<i>Nominal</i>	0,4-0,8	0,7max	0,15-0,4	0,8-1,2	0,15 max	0,04-0,35	0,25max	0,15max	Resto
<i>Medida</i>	0,624	0,318	0,89	0,941	0,028	0,062	0,061	0,019	96,97

**Tabla 19.** Composición química medida y nominal de aleación de bronce UNS C90700, porcentaje en peso.

<i>Elemento</i>	<i>Sn</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Ní</i>	<i>Si</i>
<i>Nominal</i>	10-12	0-0,50	88-90	0-0,50	0-0,005	0,0015	0,50	0,005
<i>Medida</i>	8,717	0,146	90,78	0,198	0,0010	0,0071	0,098	0,0020

**Tabla 20.** Composición química medida y nominal de aleación de latón UNS C 38500, porcentaje en peso.

<i>Elemento</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Otros</i>
<i>Nominal</i>	Resto	2-3,8	55-60	0-0,35	0,5 total
<i>Medida</i>	40,42	3,93	55,33	0,13	Resto

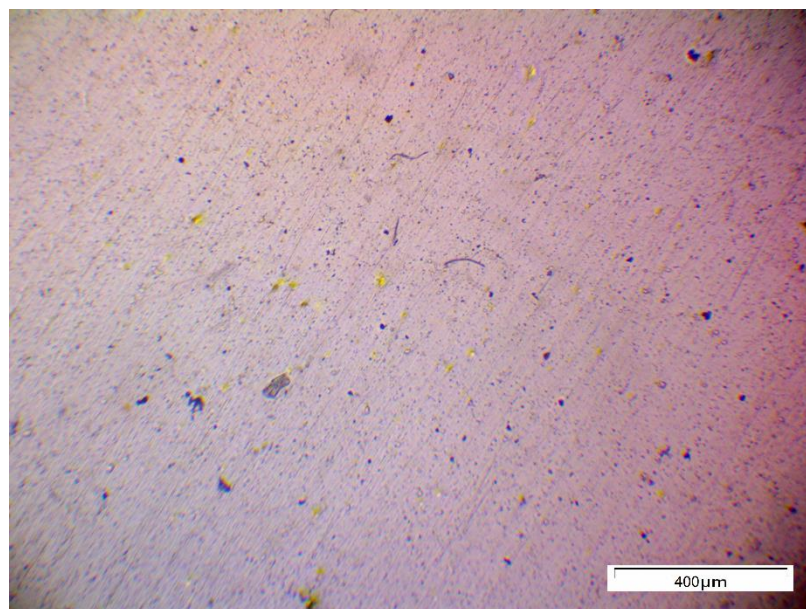
Véase que los valores de cada elemento se encuentran dentro del rango definido en la norma UNS para cada aleación, con excepción del elemento cobre en la aleación de aluminio que duplica al valor del porcentaje nominal máximo mostrado en la Tabla 18. Debido a esto, se verificaron los rangos de los elementos con otras normas UNS para establecer la serie a la que pertenece, dando similitudes con la serie 2xxx que tiene como principal aleante el elemento cobre, sin embargo los otros elementos no se encontraron en los rangos permisibles. Por ello, la aleación UNS A906061 tiene como elemento principal magnesio y silicio, los cuales se encuentran en el rango adecuado, lo cual indica que a pesar del exceso de cobre, que se le puede atribuir a un error al momento de fabricación, corresponde a dicha aleación.

### **3.1.2. Microestructura**

#### **3.1.2.1. Microestructura de la aleación de aluminio UNS A906061**

La Figura 14, muestra imágenes de la microestructura de la aleación de aluminio en estado de entrega. Se aprecia una fase rica en aluminio que presenta una serie de puntos de color oscuro y partículas de color dorado. Los puntos oscuros son precipitados propios de esta aleación los cuales son compuestos de siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) producto del envejecido por precipitación. (Palas, M. 2012). Acorde a la literatura, la solubilidad del compuesto  $Mg_2Si$  en aluminio varía en función de la temperatura. Durante la fundición de estas aleaciones, se adiciona silicio con el objeto de formar precipitados de  $Mg_2Si$  y mejorar propiedades mecánicas y físicas de la aleación. Por esta razón, el ajuste de la composición es vital para asegurar que no existe exceso de Mg o Si (Echavarría, A. y Orrego, G. 2012). Las partículas de tonalidad doradas podrían

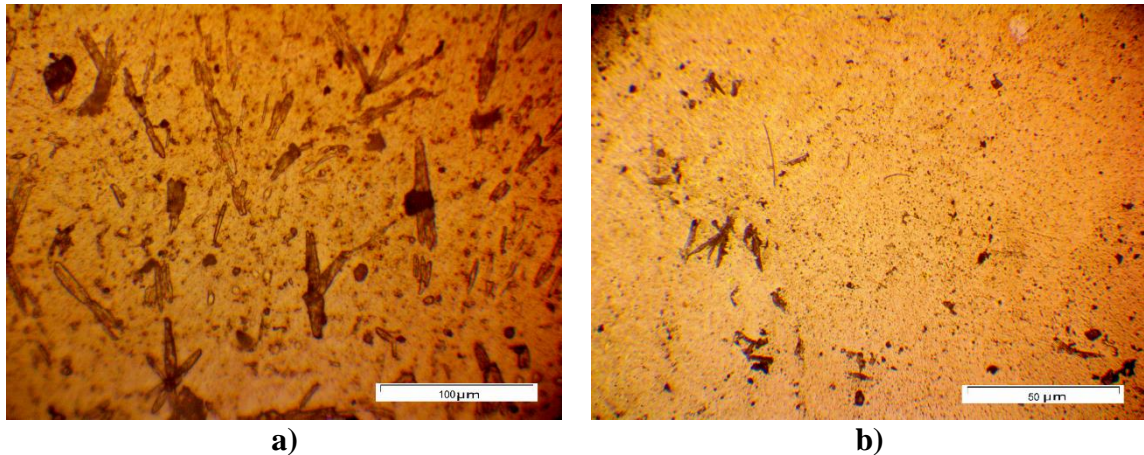
corresponder al exceso de cobre presente en la composición química, puesto que el porcentaje en peso presente es el doble del valor definido en la norma como se mostró en los resultados de espectrometría de emisión óptica.



**Figura 14.** Microestructura de la aleación de aluminio UNS A906061 en estado de entrega. Ataque 222. MO. 10 X. Fuente: Propia del autor.

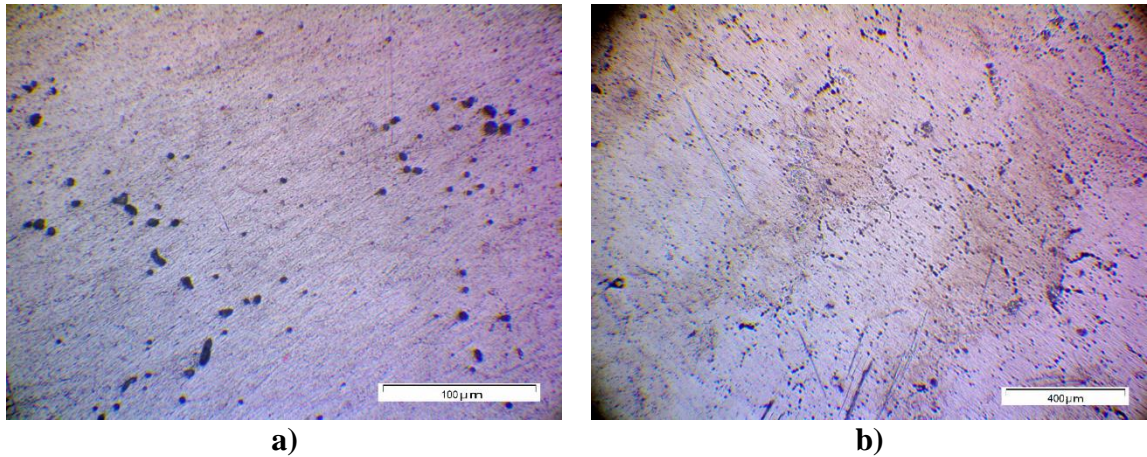
La Figura 15, muestra imágenes de la microestructura correspondiente a la aleación de aluminio posterior al tratamiento térmico de envejecido natural T4. Dichas fotografías fueron tomadas 48 horas después del tratamiento. Se pueden apreciar diversos precipitados, unos en forma de letras chinas y otras en forma de agujas finas alargadas aciculares. Acorde a lo descrito por Echarri, J. et all. (2013), estos precipitados corresponden a compuestos intermetálicos de siliciuro de magnesio  $Mg_2Si$  y a partículas de  $AlFeSi$  respectivamente, comparándolas con la Figura 14, se nota un aumento significativo en el tamaño y forma de los precipitados.





**Figura 15.** Microestructura de la aleación de aluminio UNS A906061 después del tratamiento térmico T4. Ataque 222. MO. **a)** 50 X. **b)** 100 X. Fuente: Propia del autor.

La Figura 16, corresponde a la aleación de aluminio posterior al tratamiento térmico de envejecido artificial T6. En ella se puede apreciar una matriz de aluminio Al- $\alpha$ , junto con una red de partículas distribuidas a lo largo de los contornos de grano correspondientes a precipitados de  $Mg_2Si$ , así como agujas de la fase  $\beta-AlFeSi$ , que se transformaron en partículas más cortas y redondeadas distribuidos homogéneamente en los límites de grano los cuales no se apreciaron en las imágenes de la aleación en estado de entrega. Samaras, N. (2007) mostró que en esta aleación de aluminio durante el tratamiento térmico de envejecido a 580 °C la fase  $Mg_2Si$  coalesce y se disuelve completamente durante el calentamiento y es la responsable del endurecimiento por precipitación. No se observaron grietas ni poros o inclusiones en la microestructura.



**Figura 16.** Aleación de aluminio UNS A906061 después del tratamiento térmico T4 y T6. Ataque 222. MO. **a)** 50 X. **b)** 10 X. Fuente: Propia del autor.

En el caso en particular de la aleación de aluminio, se realizó un tratamiento térmico de homogenizado para obtener un tamaño de grano uniforme, acorde a lo establecido por Merino, M. (2012) , donde se detalla que cuando la temperatura es lo suficientemente elevada, los límites de grano migran debido a que se disminuye la energía libre al reducir el número de granos y por tanto aumentando en tamaño medio, debido a la presencia de precipitados en este caso particular  $Mg_2Si$ , los límites de grano al desplazarse se encuentran con las partículas de la fase precipitada, la cual se asociarán a ellas de manera que las partículas "tirarán" del límite restringiendo su desplazamiento, este fenómeno hace que la matriz acumule la mayor parte de los precipitados en los bordes de grano debido al anclaje y arrastre de partículas como lo evidencia la microestructura después de los tratamientos T4 y T6. Cabe resaltar que una minoría de precipitados quedan dentro del grano, posiblemente lograron disolverse por efecto de las altas temperaturas.

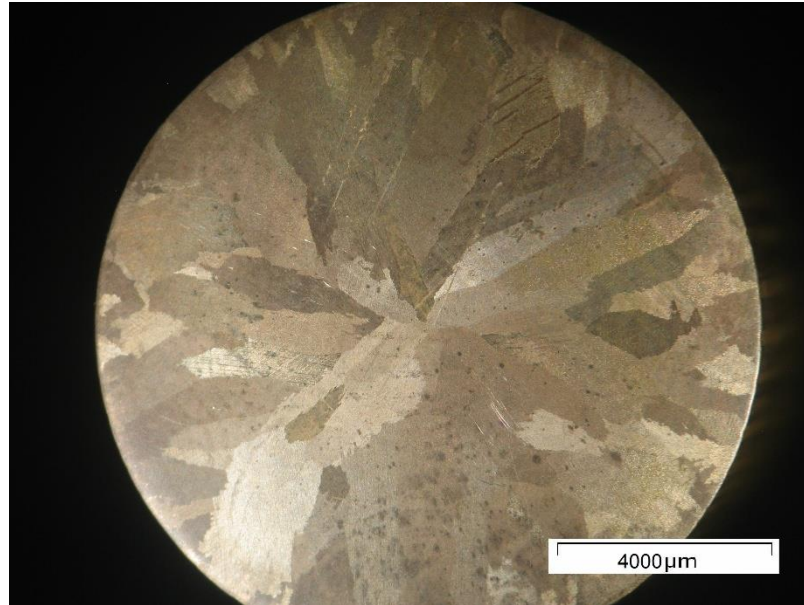
Acorde a lo estipulado por Oldani, C. (2008), la relación calculada para este compuesto endurecedor según la composición química del material analizado, es de 1.5 %  $Mg_2Si$ , para evitar que esto suceda ha de llevarse a cabo un tratamiento de solución dentro de un margen muy estrecho 550 - 590 °C, permitiendo la disolución completa del compuesto, de esta manera se mejorarían las propiedades mecánicas de dicha aleación.

Analizando lo encontrado por Pereira, J. et al. (2010) ocurrió lo opuesto, ya que al aplicarle los tratamientos T4 y T6 fueron influenciadas de manera significativa las propiedades mecánicas incrementando tanto la resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción y dureza.

Por último, la dureza para la aleación de aluminio en estado de entrega fue de 117 HB, valor muy cercano a lo establecido por la teoría en estado T6 (95 HB). Luego de realizar el tratamiento T4, su dureza disminuyó a 58 HB, aproximadamente la mitad del valor inicial, mientras que al realizar T6 se obtuvo una dureza de 115 HB, valor semejante al inicial.

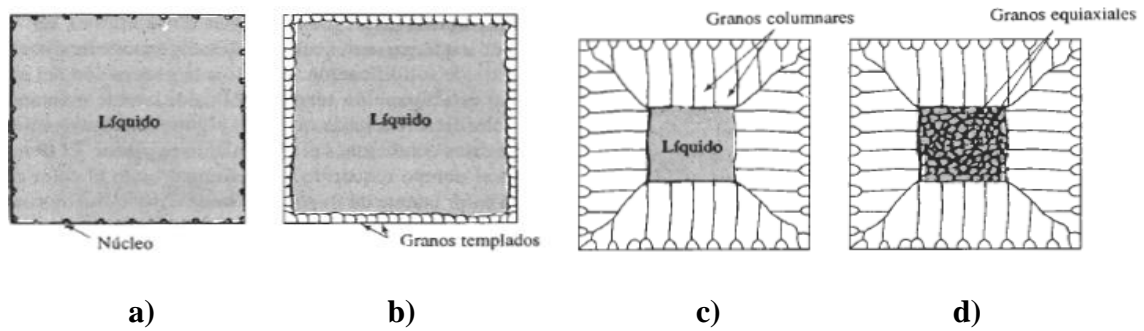
### **3.1.2.2. Microestructura de la aleación de bronce UNS C90700**

Luego de realizar el ataque químico a la aleación de bronce se evidenciaron los granos macroscópicos mostrados en la Figura 17.



**Figura 17.** Bronce UNS C90700. Estereoscopio 4 X. Ataque 51. Fuente: Propia del autor.

Véase que hubo un crecimiento de los granos en dirección perpendicular al perímetro de la aleación, es decir, granos finos en forma columnar direccionados hacia el centro de la probeta, este fenómeno es atribuido a la transferencia de calor entre el metal fundido y la pared del molde. La forma y características de estos granos son típicos en los procesos de fundición (Montaño, F. 2004) como se aprecia en la Figura 18 donde se muestra un esquema de los granos típicos producidos en fundición durante la solidificación.

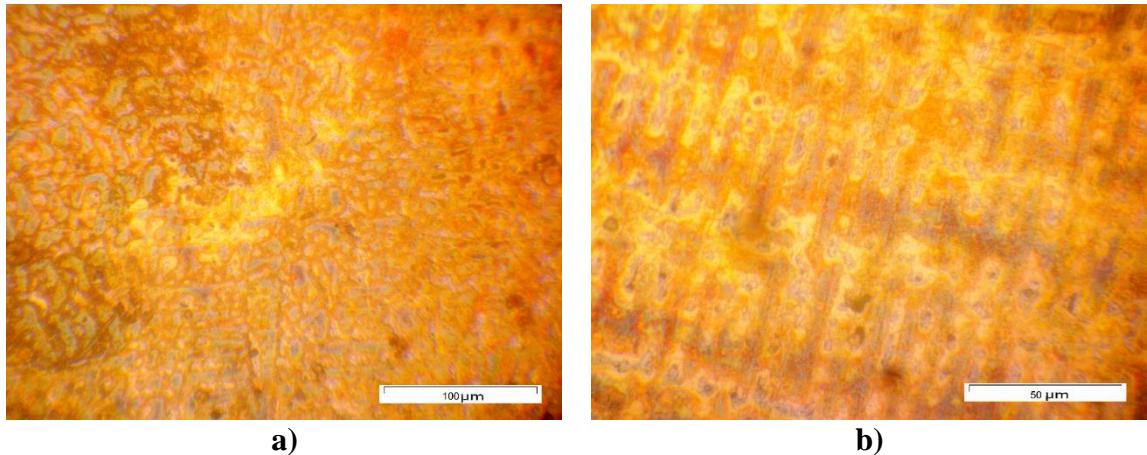


**Figura 18.** Desarrollo de la macroestructura de una fundición durante la solidificación: a) Se inicia la nucleación, b) se forma la zona templada, c) un crecimiento preferencial produce la zona columnar y d) la nucleación adicional crea la zona equiaxial. Fuente: Askeland, D. 1998.

Además, se puede observar diferentes tonalidades en los granos formados, como consecuencia de la respuesta de la aleación al ataque químico debido a la distinta orientación cristalográfica en cada grano. (Askeland, D. 1998.)

De lo anterior se puede afirmar que el estado de entrega del material bronce fue bruto de fundición.

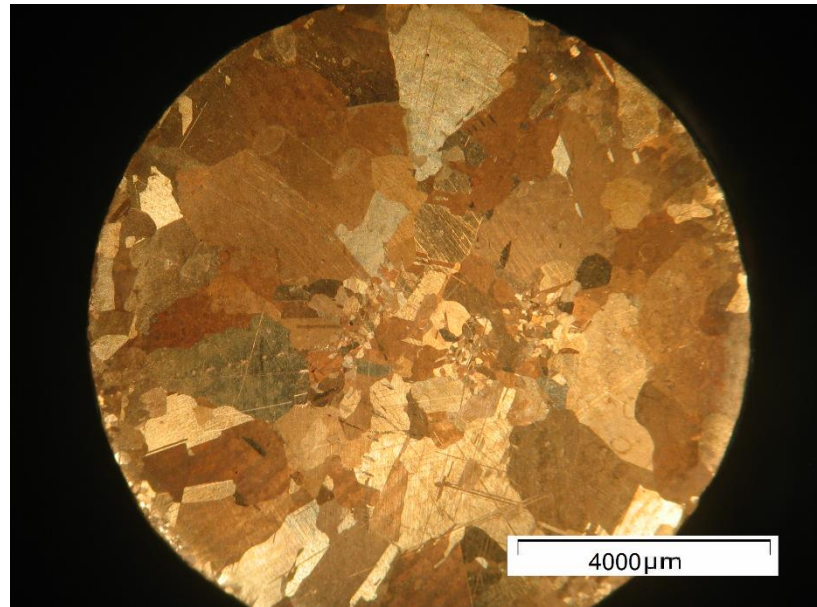
La microestructura presentada por esta aleación fue analizada con microscopía óptica usando lentes de 50 X y 100 X, como se muestran en la Figura 19.



**Figura 19.** Bronce UNS C90700 en estado de entrega. Ataque 51. MO. **a)** 50 X. **b)** 100 X. Fuente: Propia del autor.

Se puede observar que es una aleación formada por una fase  $\alpha$  rica en cobre y una fase  $\alpha+\delta$  con producto de una transformación eutectoide (Savaşkan, T. y Alemdağ, Y. 2008). Además se evidencia la presencia de dendritas, que se forman como ramas laterales que siguen creciendo y forman ramas adicionales en ángulos rectos con las primeras. Estas estructuras tipo árbol se llevan a cabo en forma gradual durante el enfriamiento, al depositarse continuamente metal adicional en las dendritas hasta completar la solidificación. Los granos resultantes de este crecimiento dendrítico adoptan una orientación preferente y tienden a ser burdos y alinearse en forma de granos columnares hacia el centro de la fundición (Montaño, F. 2004). La Figura 20, muestra la estructura de la aleación después del tratamiento térmico de homogenizado.

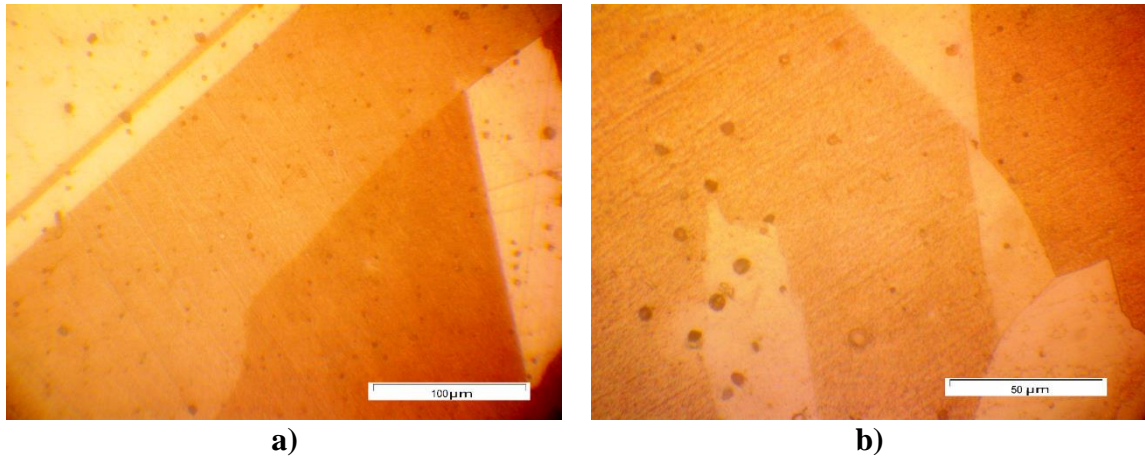




**Figura 20.** Bronce UNS C90700 tratado térmicamente. Estereoscopio a 4 X. Fuente: Propia del autor.

Nótese que los granos columnares perdieron su forma de agujas finas orientados hacia el centro como resultado de un proceso de recrystalización y/o nucleación de nuevos granos a partir de los contornos de grano. Por otro lado, no hubo un homogenizado total ya que se observan diferentes tamaños de grano, esto pudo ocurrir porque el tiempo de sostenimiento no fue el adecuado para conseguir un tamaño de grano homogéneo en toda la aleación. Se podría recomendar dejar la aleación por más de 5 h y/o aumentar la temperatura a más de 775 °C durante el tratamiento de homogenizado.

La Figura 21, corresponde a la aleación de bronce posterior al tratamiento de homogenizado a 775 °C.



**Figura 21.** Bronce UNS C90700 con homogenizado a 775 °C. Ataque 51. MO. **a)** 50 X. **b)** 100 X. Fuente: Propia del autor.

Detallando la microestructura, se observa una sola fase  $\alpha$  rica en cobre, nótese además, la presencias de maclas de recocido en donde la diferencia de tonalidad se debe a la diferencia del ataque químico producido en la preparación metalográfica, motivo por cual los granos reflejan en forma diferente la luz como consecuencia de la distinta orientación cristalina de los cristales que emergen a la superficie (Universidad Politécnica de Valencia. 2013). No se observaron grietas ni poros o inclusiones en la microestructura.

Las maclas presentan bordes rectilíneos y paralelos que dividen el grano indicando que son producto del tratamiento de recocido y que no surgieron a partir de algún proceso de deformación en frío antes de dicho tratamiento. (Kashani P. Sodaee B. 2013)

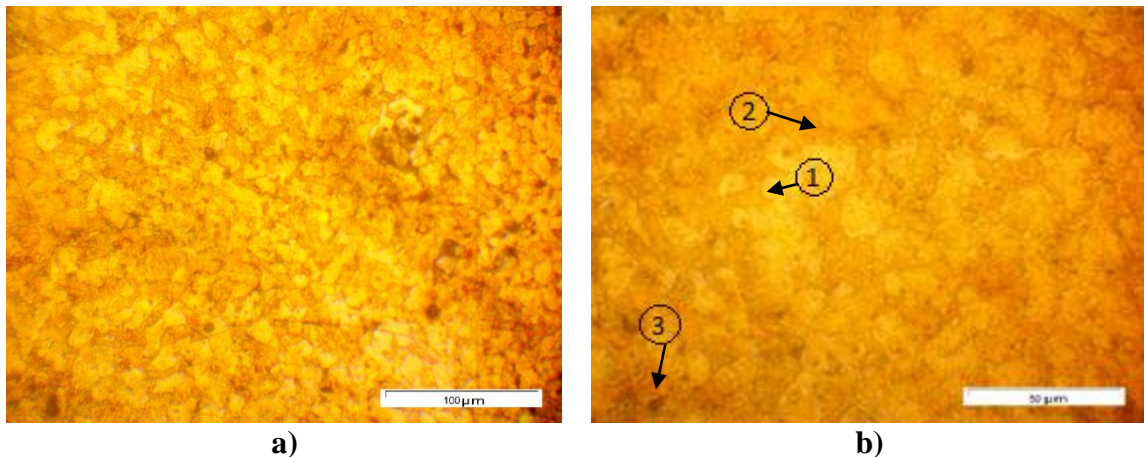
En consecuencia, el maclado es un mecanismo de endurecimiento que potencia la inhibición de flujo plástico por deslizamiento, por partición del grano y bloqueo de los bordes, comparando los resultados obtenidos de dureza antes y después del tratamiento



térmico, 87 HB y 106 HB respectivamente, se confirma un aumento del valor de dureza para dicha aleación.

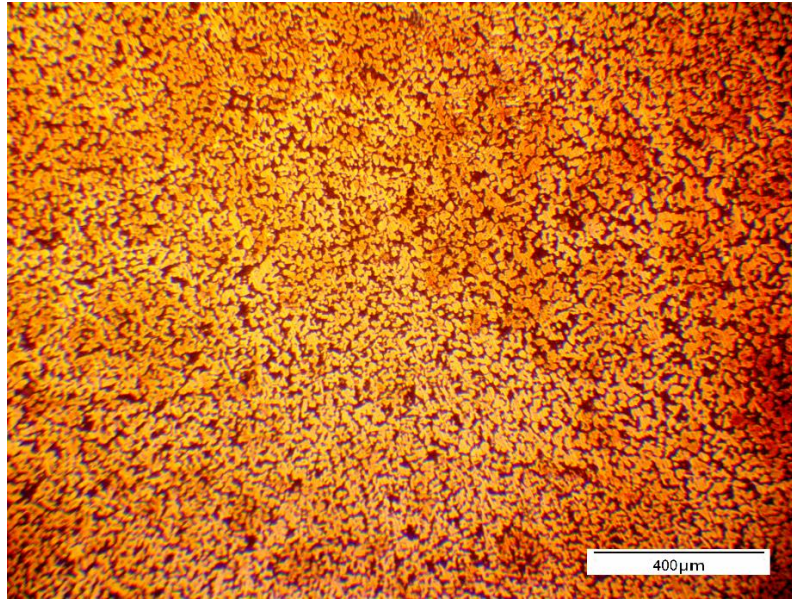
### 3.1.2.3. Microestructura de la aleación de Latón UNS C38500

La microestructura del latón se puede observar en la Figura 22, donde se destacan una fase  $\alpha$  (1) y una fase  $\beta$  (2) con precipitaciones de plomo (3) en forma de esferas oscuras y esferas brillantes en la imagen. El plomo precipita en las regiones primitivas interdendríticas y se concentra básicamente en la fase  $\beta$  y en los límites de la fase  $\alpha$  como se destaca en la teoría. (Nogués, E. 2008).

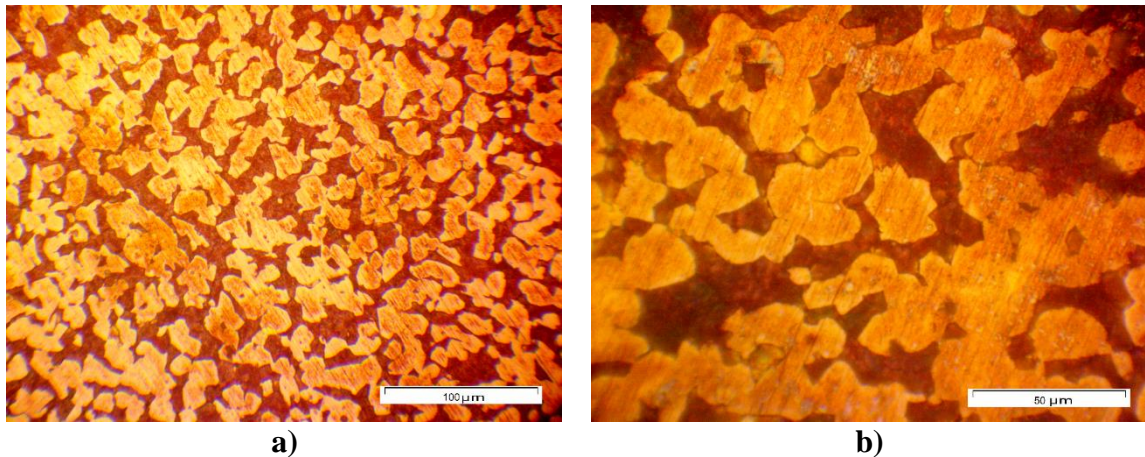


**Figura 22.** Latón UNS C38500 en estado de entrega. Ataque 29. MO. **a)** 50 X. **b)** 100 X. Fuente: Propia del autor.

Las imágenes presentadas en las Figura 23 y **Figura 24**, corresponden a la microestructura del latón después del tratamiento térmico de recocido tomadas en la misma zona con aumentos de 10 X y 50 X (a) y 100 X (b) respectivamente.



**Figura 23.** Latón UNS C38500 con recocido a 500°C. Ataque 51. MO. 10 X. Fuente: Propia del autor.



**Figura 24.** Latón UNS C38500 con recocido a 500°C. Ataque 51. MO. **a)** 50 X. **b)** 100 X. Fuente: Propia del autor.

El tratamiento térmico de recocido logró disolver gran parte de los precipitados observados en el estado de entrega. Adicionalmente se puede observar en toda la superficie de la muestra una distribución homogénea de los granos, apreciando la fase  $\alpha$

rica en cobre bien demarcada de tonalidad clara cobre así como la fase  $\beta$  correspondiente a las zonas de color más oscuro, evidenciando una homogenización en la composición de la aleación. No se observaron grietas ni poros o inclusiones en la microestructura.

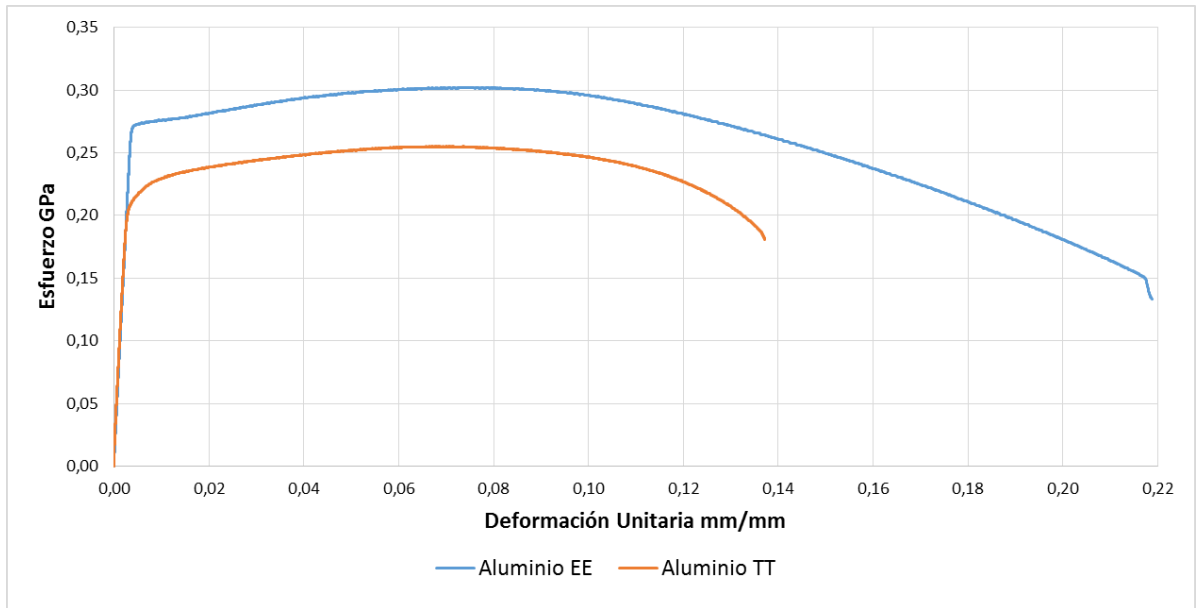
Por otro lado el tamaño de grano aumentó respecto al estado de entrega producto del proceso de recristalización durante el tratamiento térmico.

Además, la dureza arrojó un resultado de 61 HRB para la aleación en estado de entrega, similar a la establecida por la teoría de 65 HRB y de 79 HRB luego del tratamiento térmico, notando un aumento en esta propiedad.

### 3.2. ENSAYOS DE TENSIÓN

#### 3.2.1. Aluminio UNS A906061

La Figura 25, muestra las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación de aluminio en estado de entrega (EE) y después de los tratamientos térmicos T4 y T6 (TT).



**Figura 25.** Curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación UNS A906061 en estado de entrega (EE) y después de los tratamientos térmicos T4 y T6 (TT). Fuente: Propia del autor.

De dicha gráfica se puede apreciar una reducción en los esfuerzos al momento de realizar TT a esta aleación. Además, se observa una pendiente similar en la zona elástica, es decir, su módulo de Young no cambia ya que es una constante para cada aleación. Así mismo, la resiliencia, tenacidad y elongación disminuyeron, haciendo que sea menos dúctil comparado con el EE.

La Tabla 21, relaciona las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas.

**Tabla 21.** Propiedades mecánicas del aluminio UNS A906061 en estado de entrega (EE) y después de los tratamientos térmicos T4 y T6 (TT) obtenidas a partir de las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria.

<b>Propiedades Mecánicas del Aluminio UNS A906061</b>							
<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Esfuerzo ultimo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de Fluencia (MPa)</b>	<b>Elongación (%)</b>	<b>Reducción de área (%)</b>	<b>Resiliencia (J/mm<sup>3</sup>) x 10<sup>-3</sup></b>	<b>Tenacidad (J/mm<sup>3</sup>) x 10<sup>-3</sup></b>
<b>EE 1</b>	74,72	330,49	302,00	5,03	66,62	0,44	53,78
<b>EE 2</b>	73,02	339,63	307,00	4,67	63,47	0,43	48,29
<b>EE 3</b>	77,61	302,10	269,00	5,20	69,14	0,45	56,48
<b>Promedio EE</b>	<b>75,12 ±2,3</b>	<b>324,07 ±19,6</b>	<b>292,67 ±20,6</b>	<b>4,97 ±0,3</b>	<b>66,41 ±2,8</b>	<b>0,44 ±0,01</b>	<b>52,85 ±4,2</b>
<b>TT 1</b>	90,74	255,07	219,00	5,73	52,54	0,29	30,74
<b>TT 2</b>	73,62	251,37	222,00	6,25	52,07	0,28	28,45
<b>TT 3</b>	74,70	115,72	80,00	6,67	54,55	0,31	32,45
<b>Promedio TT</b>	<b>79,69 ±9,6</b>	<b>207,39 ±79,4</b>	<b>173,67 ±81,1</b>	<b>6,22 ±0,5</b>	<b>53,05 ±1,3</b>	<b>0,29 ±0,02</b>	<b>30,55 ±2,0</b>

Nótese que los valores del módulo de Young, de esfuerzo último y esfuerzo de fluencia en las probetas EE son muy próximos al valor establecido por la teoría de 69,5 GPa, 310 MPa y 276 MPa respectivamente para esta aleación de aluminio en estado T6. La bibliografía, la composición química junto con la microestructura encontrada y la dureza, confirman que el aluminio UNS A906061 en estado de entrega fue sometido a un tratamiento térmico T6.

El tratamiento térmico aplicado disminuyó las propiedades mecánicas de las probetas TT. Comparando estos resultados con la teoría, se puede observar que cae en el rango de un tratamiento térmico T4 donde los valores del esfuerzo último y del esfuerzo de fluencia son 241 MPa y 145 MPa respectivamente. Por lo tanto, se podría inferir que el

tratamiento T6 no se realizó adecuadamente ya sea por la temperatura empleada, los implementos o el tiempo de sostenimiento.

Adicionalmente a las razones anteriormente expuestas, la presencia de los precipitados en los contornos de granos disminuyeron las propiedades mecánicas.

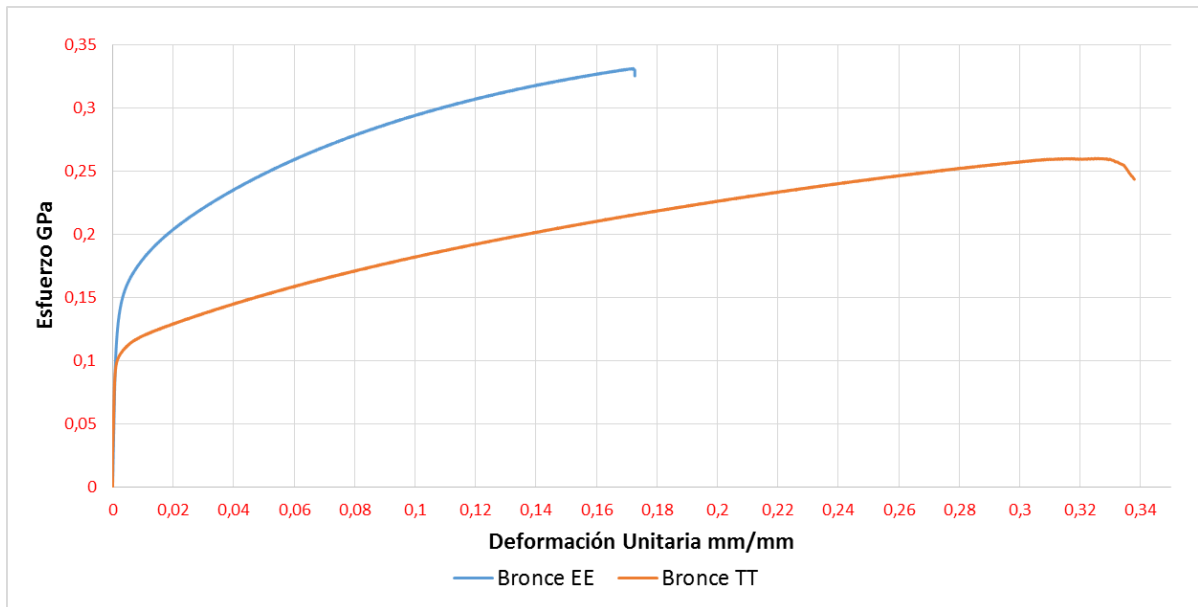
El ensayo a tensión para la aleación de aluminio en estado de entrega posee buena ductilidad puesto que la fractura de las probetas presentaron la falla característica tipo copa y cono de un material con respuesta dúctil [Schaffer. J., *et all.* (2000)]. En esta falla, hubo formación de pequeñas cavidades localizada en el cuello, formando una grieta que se propago resultando una cizalladora a un ángulo a  $45^\circ$  respecto a la línea de acción de la carga, en el caso de las probetas tratadas térmicamente (T4,T6) se observa un alargamiento en mayor proporción respecto a su estado de entrega puesto que presentaron un gran alargamiento en el periodo de estricción y rotura observándose mayor oposición a la fractura como se evidencia en la Figura 26.



**Figura 26.** Probetas aluminio UNS A906061 posterior al ensayo de tensión: a) probeta en estado de entrega. b) probeta con tratado térmicamente. Fuente: Propia del autor

### 3.2.2. Bronce UNS C90700

La Figura 27, muestra las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación de bronce en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de homogenizado (TT).



**Figura 27.** Curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación UNS C90700 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de homogenizado (TT). Fuente: Propia del autor.

De la anterior figura se evidencia que para ambos casos se tiene la misma pendiente, es decir, tiene el mismo módulo de Young, también se observa una disminución del esfuerzo a tensión y de fluencia en la aleación con TT respecto a la de EE. Por otro lado, la resiliencia, tenacidad y elongación han aumentado haciendo que el material sea más dúctil.



La Tabla 22, relaciona las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas. Algunos ensayos fueron realizados sin extensómetro, por tanto, algunas propiedades no pudieron calcularse, puesto que el desplazamiento mostrado en la gráfica corresponde al desplazamiento de la mordaza en vez de la deformación unitaria de la probeta, por ello se calcularon solamente propiedades independientes de la deformación unitaria, como lo son el esfuerzo último, la elongación y la reducción de área.

**Tabla 22.** Propiedades mecánicas del bronce UNS C90700 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de homogenizado (TT) obtenidas a partir de las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria.

<b>Propiedades Mecánicas del Bronce UNS C90700</b>							
<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Esfuerzo ultimo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de Fluencia (MPa)</b>	<b>Elongación (%)</b>	<b>Reducción de área (%)</b>	<b>Resiliencia (J/mm<sup>3</sup>) x 10<sup>-3</sup></b>	<b>Tenacidad (J/mm<sup>3</sup>)x10<sup>-3</sup></b>
<b>EE 1</b>	-	415,30	170,00	5,33	6,56	-	-
<b>EE 2</b>	-	176,65	-	6,73	24,89	-	-
<b>EE 3</b>	117,21	331,21	148,00	6,98	16,81	-	-
<b>Promedio EE</b>	<b>117,21</b>	<b>307,72 ±121,1</b>	<b>159,00 ±15,6</b>	<b>6,35 ±0,9</b>	<b>16,09 ±9,2</b>	-	-
<b>TT 1</b>	103,27	293,10	108,00	16,28	40,83	0,86	60,23
<b>TT 2</b>	105,92	260,14	111,00	44,26	37,40	1,06	71,58
<b>TT 3</b>	86,63	292,77	117,00	15,79	36,00	0,91	65,07
<b>Promedio TT</b>	<b>98,61 ±10,5</b>	<b>282,00 ±18,9</b>	<b>112,00 ±4,6</b>	<b>25,44 ±16,3</b>	<b>38,08 ±2,5</b>	<b>0,94 ±0,1</b>	<b>65,63 ±5,7</b>

Véase que los esfuerzos de tensión y de fluencia de las probetas EE están cercanos al esfuerzo descrito en la teoría de 305 MPa y 150 MPa respectivamente, mientras que los esfuerzos de las probetas TT están ligeramente por debajo de estos valores. Por otro lado, la elongación de las probetas TT se cuadruplicó respecto a las probetas EE pasando de 25,44 % a 6,35 %, evidenciando el aumento en la ductilidad de esta aleación producto



del tratamiento térmico de homogenización, este aumento favorece la maquinabilidad durante trabajos en frío.

En el caso particular de las probetas de bronce tratadas térmicamente se observó un alargamiento considerable de los especímenes de aproximadamente 25 mm valor elevado respecto a las probetas sin tratamiento, lo que indica de manera contundente la ganancia de ductilidad de dicho material posterior al tratamiento, además se observó un fractura macroscópica de copa y cono, característica de materiales dúctiles dejando como resultado en los bordes del cuello un aspecto fibroso y de cizalladura (Gibson, P. 2008), como se muestra en la Figura 28.

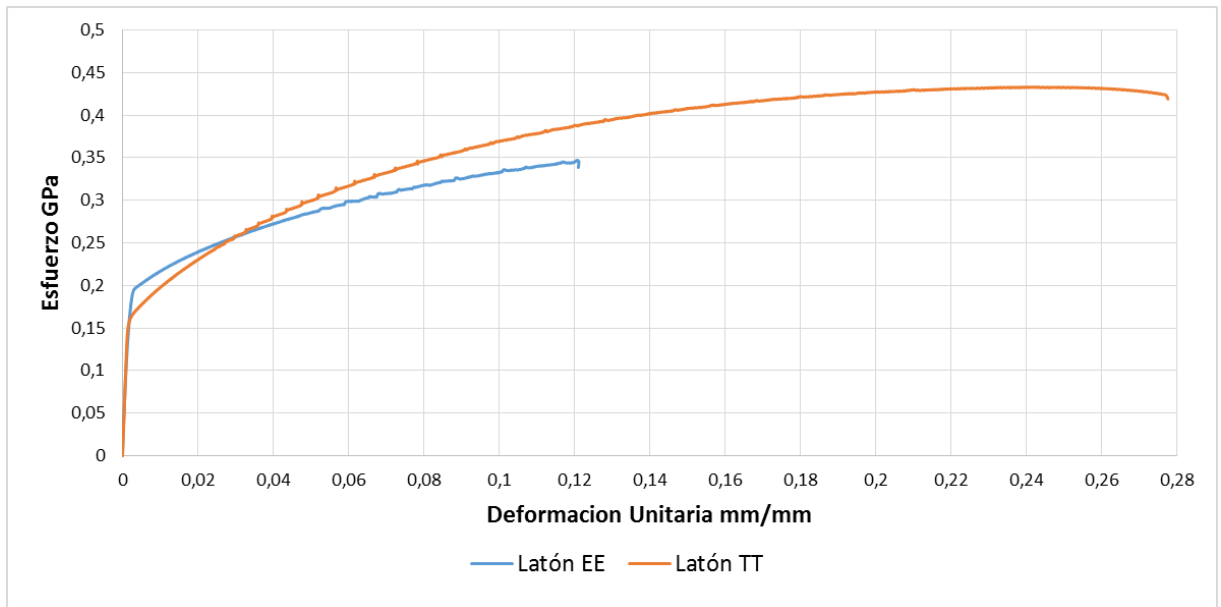


**Figura 28.** Probetas bronce UNS C90700 posterior al ensayo de tensión: a) probeta en estado de entrega. b) probeta con tratado térmicamente. Fuente: Propia del autor

Cabe resaltar que esta aleación presenta aspectos típicos de un material dúctil, ya que tiene un gran alargamiento la zona de estricción y rotura, en el cual la homogeneización cambia propiedades mecánicas tales como la resistencia última a la tensión, dureza y límite de elasticidad, las cuales disminuyen lentamente, mientras que la elongación a la fractura y encuellamiento incrementan hasta el doble del valor inicial (Cohen, A. (1991).

### 3.2.3. Latón UNS C38500

La Figura 29, muestra las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación de latón en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de recocido (TT).



**Figura 29.** Curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de la aleación UNS C38500 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de recocido (TT).

Fuente: Propia del autor.

De la figura anterior se puede observar un aumento considerable en las propiedades mecánicas como el esfuerzo último, tenacidad y elongación para las probetas TT respecto a las probetas EE.

La Tabla 23, relaciona las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas. Dos de los ensayos realizados para las probetas EE se realizaron con una programación de prueba, donde ocurrió un error con el almacenamiento de datos, lo cual provocó la

pérdida de los valores de los ensayos. Por esta razón solo se reporta los valores obtenidos de una probeta EE.

**Tabla 23.** Propiedades mecánicas del latón UNS C38500 en estado de entrega (EE) y después del tratamiento térmico de recocido (TT) obtenidas a partir de las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria.

<b>Propiedades Mecánicas del Latón UNS C38500</b>							
<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Esfuerzo último (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de Fluencia (MPa)</b>	<b>Elongación (%)</b>	<b>Reducción de área (%)</b>	<b>Resiliencia (J/mm<sup>3</sup>) x 10<sup>-3</sup></b>	<b>Tenacidad (J/mm<sup>3</sup>) x 10<sup>-3</sup></b>
<b>EE 1</b>	111,86	346,92	202,00	3,60	39,51	0,15	34,47
<b>TT 1</b>	95,10	448,10	181,00	4,74	36,36	0,09	87,14
<b>TT 2</b>	132,25	439,12	160,00	5,22	34,55	0,13	95,15
<b>TT 3</b>	116,57	433,12	172,00	8,11	39,51	0,14	102,38
<b>Prom TT</b>	<b>114,64</b> <b>±18,7</b>	<b>440,11</b> <b>±7,5</b>	<b>171,00</b> <b>10,5</b>	<b>6,02</b> <b>±1,8</b>	<b>36,81</b> <b>±2,5</b>	<b>0,12</b> <b>±0,03</b>	<b>94,89</b> <b>±7,6</b>

En esta aleación se puede observar un aumento en el esfuerzo último de las probetas TT comparado con las EE y con el valor reportado en la teoría de 415 MPa. Por otro lado, su esfuerzo de fluencia disminuyó comparado con el estado de entrega, pero mejoró respecto a lo reportado en la teoría de 140 MPa. De lo anterior se puede concluir que el tratamiento térmico de recocido para la aleación de latón UNS C38500 mejoró sus propiedades mecánicas.

En los ensayos realizados a la aleación de latón, se pudo observar que de los tres materiales estudiados, es el que presenta menor ductilidad después de tener tratamiento térmico, esto se evidencio por la leve deformación plástica que sufrió la probeta al momento de formarse el cuello, así como una fractura que corresponde a la de un material moderadamente dúctil, (Gibson,P.2008) a pesar de formarse el cuello en la zona

intermedia la fractura no se aprecia deformación notoria debido a la rápida propagación de la grieta, esta fracturaron en un tiempo menor en comparación a las otras aleaciones. La Figura 30, muestra la falla de las probetas de latón para la condición en estado de entrega y posterior al tratamiento térmico.



**Figura 30.** Probetas latón UNSC 38500 posterior al ensayo de tensión: a) probeta en estado de entrega. b) probeta tratada térmicamente. Fuente: Propia del autor

#### 4. CONCLUSIONES

- Acorde a la literatura y los resultados obtenidos de composición química, se encontró que las aleaciones de aluminio UNS A906061, bronce UNS C90700 y latón UNS C38500 están dentro del rango definido por la norma, confirmando de esta manera que el material en estado de entrega coincide con lo que brinda el proveedor.
- La microestructura del aluminio en el estado de entrega está constituida por una matriz de aluminio y precipitados de  $Mg_2Si$  los cuales son los responsables de los valores de dureza en la aleación. Acorde a esto, se pudo inferir que los tratamientos térmicos empleados fueron T4 y T6. Después de los tratamientos térmicos de T4 y T6 realizados en el laboratorio, se encontró que los precipitados de  $Mg_2Si$  se formaron en los contornos de granos de la matriz rica en aluminio, producto de la temperatura y tiempo de sostenimiento empleados en los tratamientos de envejecido. Por otro lado estos tratamientos disminuyeron en gran medida los valores de esfuerzo último, esfuerzo de fluencia, resiliencia y tenacidad en comparación al aluminio en estado de entrega, así mismo, la dureza paso de 117 HB a 115 HB.
- Acorde a la bibliografía y la microestructura con granos finos direccionados hacia el centro de la probeta encontrada en la aleación de bronce UNSC90700, se pudo confirmar que en estado de entrega se encuentra bruto de fundición. Así mismo, en las probetas tratadas térmicamente existió un proceso de

recristalización y crecimiento de grano el cual no se dio de forma completa como posible consecuencia de la temperatura y tiempo de sostenimiento empleados en el homogenizado. Este tratamiento redujo en gran medida los valores del esfuerzo último y del esfuerzo de fluencia, mientras que la elongación aumentó casi tres veces. La dureza paso de 87 HB a 106 HB después del homogenizado.

- La aleación de latón UNS C38500 en estado de entrega está constituido por una fase  $\alpha$  y una fase  $\beta$  con precipitaciones de plomo. Luego del recocido se observó un aumento del tamaño de grano respecto al estado de entrega producto del proceso de recristalización. Además el recocido aumentó considerablemente las propiedades mecánicas como el esfuerzo último, tenacidad y elongación. Así mismo, la dureza se incrementó de 61 HRB a 79 HRB.
- En las tres aleaciones, el módulo de Young permaneció igual a pesar del tratamiento térmico, aunque se destaca un aumento en ductilidad y presentaron fractura tipo copa y cono a 45 grados característico de materiales dúctiles.

## 5. RECOMENDACIONES

- Determinar la naturaleza química de los precipitados empleando Microscopía Electrónica de Barrido con microanálisis de rayos X usando las sondas EDS y WDS para verificar que estos sean realmente los descritos por la teoría para las aleaciones de aluminio  $Mg_2Si$  y latón con plomo.
- Realizar el tratamiento térmico T4 para la aleación de aluminio a una temperatura entre 550 y 590 °C en un tiempo de 15 a 20 horas, permitiendo la disolución completa de los precipitados de  $Mg_2Si$ , para mejorar propiedades mecánicas.
- Realizar diferentes tratamientos de homogenizado para encontrar los valores de temperatura y tiempo óptimo para conseguir un tamaño homogéneo de grano en la aleación de bronce.
- Realizar tratamientos térmicos a diferentes temperaturas y tiempos para variar el tamaño de grano y establecer relaciones entre el tamaño de grano y propiedades mecánicas.

## **6. BIBLIOGRAFÍA.**

- Askeland, D. 1998. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores, p. 366-367.
- Bobart J. 1991. In HandBook Volume 4 Heat Treating. Pag 1957-1959. ASM Handbook committee.1991.
- Brooks, C. 1991. In HandBook Volume 4 Heat Treating. Pag 1826-1827. ASM Handbook committee.1991.
- Cohen, A. 1991. In HandBook Volume 4 Heat Treating. Pag 1960-1968. ASM Handbook committee.1991.
- Cohen, A. 1992. In handbook Volume 2 Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Pag. 1180 – 1231. ASM Handbook committee.1992.
- Copper Development Association Inc (2). 2016. Metallurgy of Copper-Base Alloys. En Línea: [http://www.copper.org/resources/properties/703\\_5/](http://www.copper.org/resources/properties/703_5/) [Accedido: 25-04-2016].
- Echarri, J. et all. 2013. Efecto del tratamiento del homogenizado de la estrudabilidad de la aleación AA - 6063
- Echavarria, A. y Orrego, G. 2012. Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas. Bello,Antioquia.
- Garcés, I., Henríquez, R., & Tapia, M. 2003. Aleaciones de cobre. En línea: <http://www.uantof.cl/cobre/pdfs/capitulo3opt.pdf> [Accedido: 25-04-2016].



- Garcés, I., Henríquez, R., & Tapia, M. 2003. Aleaciones de cobre. En línea: <http://www.uantof.cl/cobre/pdfs/capitulo3opt.pdf> [Accedido: 25-04-2016].
- Garza, M.1999.Caracterizacion de precipitados en la aleación de aluminio 6061 por medio de microscopia de fuerza atómica. Tesis maestría. Universidad Autónoma Nuevo León
- Gibson, P.2008.Fabricaion y caracterización de una aleación con memoria deforma CuZnAl considerada para disipadores sísmicos. Universidad de Chile Tesis de pregrado en Ingeniería civil Mecánica. Santiago de Chile.
- Industrial Okendo. 2012. Bronce UNS C90700 - SAE65. En línea: <http://www.okendo.mx/bronce-uns-c90700-sae-65-c907.html> [Accedido: 11-04-2016].
- Industrial Okendo. 2012. Bronce UNS C90700 - SAE65. En línea: <http://www.okendo.mx/bronce-uns-c90700-sae-65-c907.html> [Accedido: 11-04-2016].
- Kashiny, P. 2013. A study of urartian metallurgy techniques casa study: urartian bronze weaponry in the reza abbasi museum. Interdisciplinaria archaeologica, natural sciences in archaeology. Vol 4. Julio 1 del 2013. Islamic Azad University Varamin Iran.
- Martyushev, N. 2010. Parameters of the dendritic structure of copper alloys. Chemistry of metals and alloys.Vol 3. Octubre 29 del 2010. National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- Merino, M. 2012. Diagramas y transformaciones de fase 4. Estructura de los sistemas metalicos. Recursos Educativos. Serie quimica de materiales. Vol 4 (3).

p.123-166. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Ciencias Químicas. Ciudad Universitaria 28040 Madrid.

- Metales y aluminios Unicornio. 2013. Aluminio 6061. En línea: <http://www.aluminiosmetalesunicornio.com.mx/6061.html> [Accedido: 24-04-2016]
- Montaña, F. 2004. solidificación y enfriamiento En línea: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-213.pdf> [Accedido: 25-05-2016].
- Moore, H. y Kibbey, D. 1987. Materiales y procesos de Fabricación. Editorial Limusa, Mexico, p.133-134.
- Nogués, E. 2008. Caracterización de latones obtenidos por colada continua. Trabajo de grado. Universitat politécnica de Catalunya. Barcelona.
- Oldani,C.Aguirre,L.Características microestructurales de la aleacion AA6061 repujada.Revista Materia. Vol 13.Junio 6 del 2008.Universidad Nacional de Cordoba.Argentina.
- Palas, M. (2012). Reconocimiento de fases en aleaciones de aluminio en estado modelado. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.
- Pereira, J. et all. 2010. Propiedades mecánicas en torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos, Revista de Ingeniería UC, VOL. 17, NO. 7, AGOSTO 2010 44 - 51 Universidad de Carabobo, Valencia – Venezuela

- Rodriguez, J., et all. 2006. Procesos industriales para materiales metálicos. Segunda edición. Visión Net, Madrid, p. 32-33.
- Rodriguez, J., et all. 2006. Procesos industriales para materiales metálicos. Segunda edición. Visión Net, Madrid, p. 32-33.
- Rooy, E. 1992. In HandBook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose Materials. Pag 17-19. ASM Handbook committee.1992.
- Schaffer. J., et all. 2000. Ciencia y diseño de ingeniería de los materiales. Compañía editorial continental. p. 363-366.
- Shackelford J, 1995. Ciencia de materiales para ingenieros. Prentice-Hall. P. 251-252.
- Stevens, R. 1992. In HandBook Volume 9 metallography and microstructures. Pag. 788. ASM Handbook committee.1992.
- Tecniaceros. Aluminio. 2013. AA6061 T6. En línea: <http://www.tecniaceros.com/pdfs/aluminio.pdf> [Accedido: 24-04-2016]
- Tyler, D. & Black, W. 1992. In handbook Volume 2 Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Pag. 1180 – 1185. ASM Handbook committee.1992.
- Universidad Politécnica de Valencia. 2013. Materiales para diseño industrial. En línea: [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm04/pfcm4\\_3\\_11.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm04/pfcm4_3_11.html) [Accedido: 21-09-2016].
- World Aluminium. 2016. Primary Aluminium Production. En línea: <http://www.world-aluminium.org/statistics> [Accedido: 21-04-2016].

## ANEXOS

**Anexo 1.** Ataques químicos para aluminio UNSA906061, bronce UNSC90700 Y latón UNSC38500.

Material	Numero de ataque	Composición	Tiempo de ataque
<b>UNS A906061</b>	222	8g Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 100 ml agua destilada	Sumergir pocos segundos a un minuto.
<b>UNS C90700</b>	51	2 g Fe CL <sub>3</sub> 5 ml HCL 30 ml agua destilada 60 ml etanol o metanol	Sumergir pocos minutos.
<b>UNS C 38500</b>	29	1g K <sub>2</sub> CR <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 4 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 50 ml agua destilada	Añadir dos gotas justo antes de usar, sumergir de pocos segundos a un minuto.

**Anexo 2.** Reglas de Hume Rothery para las aleaciones de aluminio, bronce y laton.

Reglas de Hume	ALUMINIO		BRONCE		LATON	
Rothery	Al	Mg	Cu	Sn	Cu	Zn
Radios atomicos	1,43	1,6	1,28	1,62	1,28	1,38
Diferencia de radios atómicos.	<b>11,888</b>		<b>26,563</b>		<b>7,812</b>	
Electronegatividad similar.	1,5	1,2	1,9	1,8	1,9	1,6
Estructura cristalina.	FCC	Hexa	FCC	Tetra	FCC	Hexa
Valencia	3	2	1,2	2,4	1,2	2